Zur Hypothese

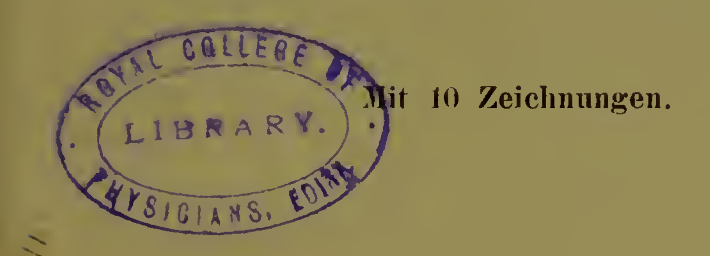
der

Sehstoffe und Grundfarben.

Von

Dr. Adolf Stöhr,

Docent a. d. Universität in Wien.

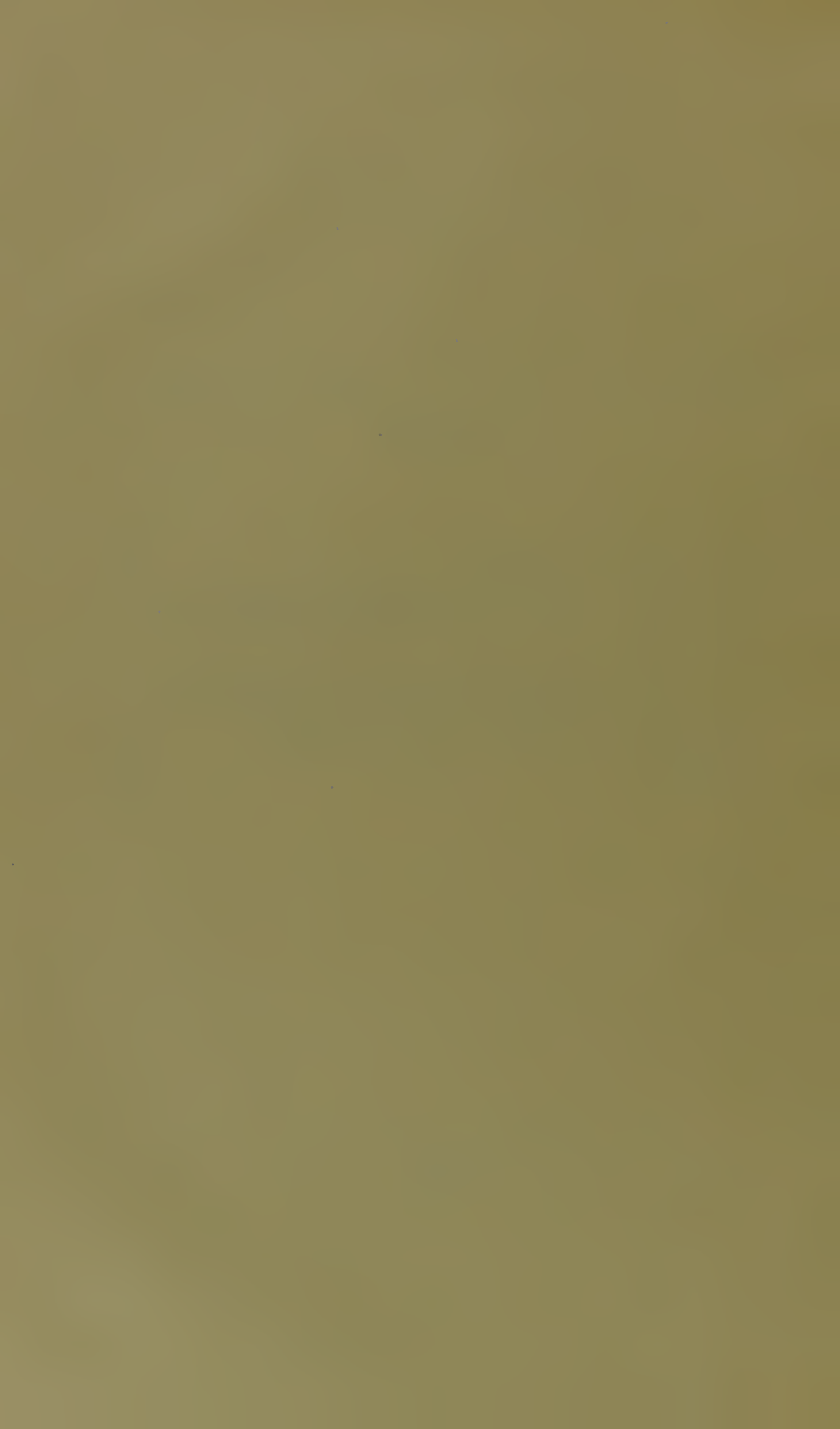


Mit 10 Zeichnungen.

LEIPZIG UND WIEN.
FRANZ DEUTICKE.
1898.

Verlags-Nr. 577.

Inhalt.



I.

Construction einer Hypothese.

Das Spectrum macht den Eindruck, als sei die Farbenmannigfaltigkeit desselben aus den Grundempfindungen Purpur, Gelb und Blau aufgebaut; und zwar in der Weise, dass Purpur in allen Wellenlängen erregt werde, vielleicht sogar in der Mitte des Spectrums am stärksten, jedoch für die resultierende Mischung verhältnismäßig am deutlichsten am Anfange und am Ende, nämlich in Roth und in Violett zur Geltung komme. Es macht ferner den Eindruck, als ob dieses Purpur zuerst von Gelb unvollkommen gedeckt werde, indem es sich zu Roth mischt, darnach aber gänzlich gedeckt werde, so dass Gelb gesehen wird; am Ende scheint eine unvollkommene Deckung durch Blau stattzufinden, indem sich Blau und Purpur zu Violett mischt, und mehr gegen die Mitte eine vollständige Deckung durch Blau; in der Mitte selbst scheint sich die Grundempfindung Blau mit der Grundempfindung Gelb zur Grün zu mischen und zur gemeinsamen vollständigen Überdeckung des hier nicht fehlenden, vielleicht sogar absolut genommen stark vorhandenen Purpur zu vereinigen.

Diesem Eindrucke folgend wähle ich zur Construction einer Hypothese die Grundfarbenempfindungen Purpur, Gelb und Blau. Die Erörterung des Begriffes der Grundfarbenempfindung soll später folgen.

Ich nehme zunächst photochemisch zersetzbare S e h s t o f f e an, welche auf ultramikroskopisch kleine, nur der Hypothese zugängliche Elemente der nervösen Structur wirken.

Ich nehme insbesondere an, dass in die nervösen Theile der Endapparate der optischen Nervenfasern in der Netzhaut ultramikroskopisch kleine Gebilde, so zu nennende *Sehkörperchen*, einmünden, deren Erregung die Farbenempfindung zugeordnet ist. Jeder Endapparat enthalte mindestens so viele Sehkörperchen, als mit dem Endapparate visible Minimen gesehen werden können.

Zum Sehen seien außer vielem anderen ein Sehstoff und ein Sehkörperchen erforderlich. Der Sehstoff allein könne ohne bestimmt geformte Erregung des Sehkörperchens keinerlei Empfindung bedingen; er sei nur ein Agens, welches das Sehkörperchen zu erregen vermag. Ohne Sehkörperchen gebe es keine Licht- und keine Farbenempfindung, trotz aller Sehstoffe. Ohne Sehstoffe hingegen könne es sehr wohl mindestens eine Lichtempfindung geben, weil die Sehstoffe nicht die einzigen Agentien sein werden, welche das Sehkörperchen zu erregen vermögen. Diese Leistung wird das Licht auch direct hervorbringen können. Ich glaube nicht, dass die photochemisch zersetzbaren Sehstoffe die Erregung der Sehkörperchen erst ermöglichen, indem das Licht die Sehstoffe zersetzt, beziehungsweise bildet, die Sehstoffe aber durch ihre Zersetzung beziehungsweise Entstehung die Sehkörperchen aufrütteln; ich glaube vielmehr, dass das Licht die Sehkörperchen unmittelbar zur Mitschwingung bringt, und dass die Sehstoffe diese Einwirkung nur verstärken und verändern. In dieser Weise suche ich den Gedanken der photophysikalischen Hypothesen mit demjenigen der photochemischen zu vereinigen. Die Annahme einer directen Erregung von Sehkörperchen durch Licht lässt sich auf alle sehenden Lebewesen anwenden. Die photochemische Hypothese der Sehstoffe trifft nur für jene Lebewesen zu, welche Sehstoffe haben.

Einer bestimmten Erregungsform des Sehkörperchens sei eine bestimmte Farben- beziehungsweise Lichtempfindung zugeordnet, so dass der Farben- und Lichtempfindungsmannigfaltigkeit eine Erregungsformenmannigfaltigkeit des Sehkörperchens gegenübersteht. Die Sehstoffe hingegen seien

nur mittelbar in Zuordnung zur Empfindung, insoferne sie bestimmte Erregungsformen des Sehkörperchens verursachen, welche durch alleinige Einwirkung des Lichtes unmittelbar auf die Sehkörperchen vielleicht nicht herausgearbeitet werden können.

Die Molecüle der Sehstoffe gehen durch Zersetzung verloren, während die Structur der Sehkörperchen im Lichte erhalten bleibt. Die Sehstoffe betrachte ich deshalb nicht als organisiert, sondern als gelöste chemische Körper, welche im Lichte verbraucht und immer aufs neue erzeugt werden. Die Sehkörperchen hingegen halte ich für verhältnismäßig compliciert gebaute, organisierte Gebilde lebendiger Materie, deren charakteristische Structur gewisser Bewegungen fähig ist, ohne durch diese Bewegungen zersetzt oder bleibend verändert zu werden.

Ich werde drei Sehstoffe annehmen müssen, einen Purpur-, einen Gelb- und einen Blaustoff. Damit soll nicht die Farbe der Sehstoffe bezeichnet sein, sondern der nahe Zusammenhang derselben mit Purpur-, Gelb- und Blauempfindung.

Die Sehkörperchen denke ich mir in ihrem Vorkommen nicht auf die nervösen Theile der Endapparate der Nervenfasern beschränkt, sondern überall dort im Nervensysteme vorhanden, wo eine chromatisch-photische Leistungsfähigkeit möglich ist. Ebenso denke ich mir nicht, dass die Sehstoffe ausschließlich auf photochemischem Wege zersetzbar seien. Es ist möglich, dass auch andere Ursachen auf die Sehstoffe wirken, und dadurch die Reizung der Sehkörperchen herbeiführen. Für diese freiere Auffassung der Sehkörperchen und der Sehstoffe spricht das Träumen in Farben, das Funkensehen infolge eines Druckes oder Stoßes auf den Augapfel, das Funkensehen infolge elektrischer Reizung, die Hallucination in Farben und anderes.

Was nun Gestalt und Größe der Sehkörperchen betrifft, so denke ich mir ein einzelnes Körperchen als einen langen Faden von bestimmter Structur und ultramikroskopischer Feinheit, der zwei „identificierende“ Netzhautpunkte miteinander verbindet, und zwar so, dass der Sehfaden von dem

1*

nervösen Theile eines Endapparates aus sich in unsichtbarer Feinheit durch das Chiasma und das mittlere centrale Sehorgan hindurch bis in die Rinde des Occipitalhirnes ununterbrochen hinzieht, daselbst umkehrt und den Weg zurück wiederum in das mittlere centrale Sehorgan einschlägt und von hier endlich durch das Chiasma zu einem gewissen „identificierend" zu nennenden Punkte der anderen Netzhaut gelangt. Zwei identificierende Netzhautpunkte enthalten nach dieser Vermuthung nur die beiden Enden eines und desselben Sehfadens oder fadenförmigen Sehkörperchens. Ein solcher Sehfaden sei gewisser Erregungen fähig, denen Empfindungen zugeordnet sind, ohne durch diese Erregungen normaler Weise zersetzt oder dauernd verändert zu werden. Die Erregung, welche an einer beliebigen Stelle hervorgerufen wird, pflanze sich mit großer Geschwindigkeit im ganzen Sehfaden fort, so dass dieses Gebilde alsbald in seiner ganzen Ausdehnung in gleichartiger Erregung begriffen sei. Der Erregung eines einzelnen Sehfadens entspreche ein visibles Minimum. Zwei Netzhautstellen seien eben dann und eben deshalb identificierende Stellen, wenn und weil sie die zwei Enden eines einzigen Sehfadens enthalten, daher ein und dieselbe Erregung an diesen zwei Stellen verursacht wird. Jeder Sehfaden sei insoferne von jedem anderen isoliert, als die specifische Structur, zu deren Erregung die Empfindung zugeordnet ist, nicht von einem Sehfaden in den anderen hinüberführt. Der complicierte Verlauf eines Sehfadens im Centralorgan ermögliche zahlreiche Anschlüsse von Nervenreizleitungen sensorischer und motorischer Natur, doch sei nirgends eine Abzweigung der specifischen, der chromatisch-photischen Leistung dienenden Elementarstructur als solcher vorhanden. Der Verlauf des Sehfadens und die dadurch ermöglichten Anschlüsse im Centralorgane dienen wahrscheinlich der Apperception mit dem übrigen Bewusstseinsinhalte, der Association, Reproduction und Bewegungsauslösung, nicht aber einem Umsatze eines unbekannten Nervenreizes in optische Empfindung. Wir sehen sozusagen nicht mit dem Auge allein und nicht mit einem Bezirke des Ge-

hirnes allein, sondern mit beiden zusammen. Die Empfindung eines visiblen Minimums sei der Erregung eines Sehfadens in der Gänze der Erregungsform dieser morphologischen Einheit zugeordnet, und der empfundene Sehraum der Gänze des Systems der erregten Sehfäden.

Dadurch bin ich veranlasst, die Verbindung zwischen zwei Netzhautpunkten, deren Erregung eine gemeinsame ist, weil sie die zwei Enden eines Sehfadens betrifft, für dauernd und angeboren zu halten. Ich nenne daher zwei in diesem Sinne der Hypothese zusammengehörende Netzhautpunkte „identificierende“ Punkte. Ich unterscheide diese Bezeichnung nicht nur von „correspondierend“ und „sich im gegebenen Falle deckend“ sondern auch von „identisch“. Versteht man nämlich unter identischen Netzhautpunkten solche, auf welchen sich bei Parallelstellung der Augen und Accommodation auf die grösste Entfernung ein leuchtender Punkt aus sogenannter unendlicher Ferne abbildet, dann werden sehr viele „identificierende“ Punkte nicht „identisch“ sein. Der Zusammenhang der Lage der identificierenden Netzhautpunkte mit der Augenstellung scheint lediglich aus der Anpassung der Anlage an das Bedürfnis der Lebenserhaltung erklärlich zu sein und keine einfache Formel zu haben.

Weil aber die Annahme einer verhältnismäßig variablen, jedenfalls aber nicht unabänderlich angebornen structurellen Verbindung zwischen einheitlich wirkenden Netzhautpunkten zur herrschenden geworden ist, und ich durch Anführung triftiger Gründe für meinen Standpunkt von der Behandlung des Themas, nämlich der Sehstoffe und der Grundfarben, abgelenkt würde, so will ich zur Vereinfachung zugeben, dass man die folgenden Constructionen auch unter Zugrundelegung einer variablen Verbindung ausführen könnte. Man kann für den Sehfaden ein Paar von Sehkörperchen einsetzen, welche in ultramikroskopischer Kleinheit in den nervösen Theilen eines Paares von Endapparaten enthalten und so auf zwei Augen vertheilt sind. Diese Sehkörperchen seien specifischer Erregungsformen fähig. Diese Erregungen setzen sich in die Nervenreize X und X′ um. Durch Leitung und

Vereinigung von X und X' im Centralorgane entstehe eine einheitliche Bedingung für eine einheitliche Empfindung, welche bei Gleichheit von X und X' den Sinn einer Verstärkung, bei Ungleichheit den Sinn einer Mischung hat. In einem Endapparate sollen mehrere Sehkörperchen Platz haben können.

Den Unterschied zwischen Stäbchen und Zapfen sowie die Vertheilung derselben bringe ich nicht in einen Zusammenhang mit einem Unterschiede der Sehkörperchen und mit der Vertheilung der Sehstoffe an die letzteren. Ich nehme vielmehr an, dass alle Sehkörperchen mindestens für dieselbe Species von Lebewesen, vielleicht sogar für den ganzen Vertebraten-Typus in wesentlichen gleich geformt seien. Es sei ganz gleichgiltig für die elementare Structur, ob diese unsichtbar feinen Körperchen in Stäbchen oder in Zapfen eingebettet ausmünden. Ich nehme auch für das menschliche Auge nur eine einzige Form von Sehkörperchen an, also nicht Purpur-, Gelb- und Blaukörperchen, sondern nur eine einzige Art, den Sehfaden. Jeder Sehfaden könne sowohl durch Purpur-, als auch durch Gelb- und Blaustoff angeregt werden; allerdings durch jeden Stoff in anderer Art und durch alle zusammen in einheitlich resultierender Weise. Den Unterschied zwischen Stäbchen und Zapfen möchte ich lediglich mit der Sammlung und Zurückwerfung des Lichtes in Verbindung bringen. Die Stäbchen scheinen dem Sehen bei geringen, die Zapfen bei höheren Lichtintensitäten zu dienen, und der Unterschied zwischen diesen Gebilden überhaupt eine noch tiefergehende Bedeutung in katoptrischer Hinsicht zu haben. [1]) Die Vertheilung der Stäbchen und Zapfen unter den tagsehenden und nachtsehenden Säugern und Vögeln deutet darauf hin; ebenso die Vertheilung dieser Elemente in der menschlichen Netzhaut, deren Peripherie empfindlicher, jedoch undeutlicher sieht als das Centrum und als Auffangapparat dient.

---

[1]) In meiner Schrift „Zur nativistischen Behandlung des Tiefensehens", Leipzig u. Wien 1892, habe ich den Gedanken eines katoptrischen Netzhautbildes zu entwickeln versucht.

Über die Structur und die Erregungsformen des Sehfadens lässt sich offenbar nichts aussagen. Der Phantasie ist hier der weiteste Spielraum gelassen. Indessen ist es immerhin möglich, der Exemplification halber eine anschauliche Hilfsvorstellung zu construieren, welche durch zehn oder mehr andere ebenso gute oder bessere nach Belieben ersetzt werden kann. Ich stelle mir zum Zwecke dieser Exemplification den Sehfaden als ein Gebilde vor, welches aus einem cylindrischen centralen Theile besteht, der dem ganzen System als Stütze und als Zuleitungsrohr für Nährstoffe dient, und aus feinen Blättchen oder Flügeln, den eigentlichen Sehorganen, welche dem centralen Theile in eigenartiger Weise eingefügt sind. Will man keinen Sehfaden mit binocularer Mündung annehmen, sondern in jedem Auge ein besonderes Sehkörperchen, so kann man den centralen Cylinder durch ein centrales Kölbchen oder dergleichen ersetzt denken. Nehme ich nun einen Querschnitt durch einen Sehfaden, also senkrecht zur Axe des centralen Cylinders, so wird dieser selbst im Durchschnitte als Kreis vertreten sein. Die in den Querschnitt fallenden Sehblättchen oder Sehflügel seien als Flächen um den centralen Ring herum gestellt. Sie sollen, in diesem Ringe wurzelnd und in radialer Richtung von einander getrennt einen Kranz von Elementarorganen vorstellen, wie aus Figur 1 ersichtlich sein möge.



Fig. 1.

Bezüglich dieser allgemeinen Form seien alle beliebigen Querschnitte untereinander gleich, so dass die Betrachtung eines einzigen Querschnittes für alle übrigen genügt. Der Sehfaden gleiche einem Stabe, der durch eine außerordentlich große Zahl von parallel übereinander geschichteten und in je 4 Sectoren getheilten Kreisscheiben central durchgezogen ist und die viergetheilten Kreisringe zu je einem Kreisringe zusammenhält. Die Kreisscheiben sollen äusserst nahe hintereinander folgen. Lege ich durch ein Stück des Sehfadens einen Längsschnitt, der also die Cylinderaxe ent-

hält, so erscheint das Stück des centralen Cylinders als zweiseitig offenes Rechteck und die in den Schnitt fallenden Sehblättchen, welche im Querschnitt des Sehfadens sehr breit erscheinen, sind nun im Längsschnitte sehr dünn. Sie erscheinen wie dünne Stäbchen oder dünne Zähne eines Doppelkammes, wie mit Uebertreibung der Zwischenräume aus Figur 2 erhellen möge.

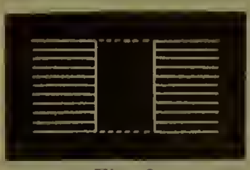


Fig. 2.

Nun betrachte ich einen Querschnitt des Sehfadens (Fig. 1). Jedes der vier Blättchen p, g, b und a sei ein materielles elastisches System, welches einer auf die Ebene des Querschnittes transversalen Schwingung fähig sei. Die materielle Beschaffenheit sei innerhalb eines einzelnen Querschnittes eines Sehfadens für jedes Blättchen eine andere, sodas auch die von der materiellen Beschaffenheit abhängige Schwingungszahl für jedes Blättchen eine andere sei. Es sollen im ganzen vier von einander verschiedene Stimmungen vorhanden sein, entsprechend den vier Sehblättchen. Jedes Sehblättchen habe in allen seinen Theilen eine einzige Stimmung. Die Stimmungen gleichnamiger Blättchen verschiedener Querschnitte seien untereinander gleich.

Jedes Sehblättchen habe nun die Fähigkeit, im ganzen Spectrum Licht zu absorbieren und dadurch in die dem betreffenden Blättchen vermöge seiner Molecularstructur eigenthümliche Schwingung von constanter Schwingungszahl versetzt zu werden, wobei die Größe der Amplitude eines bestimmten Punktes im schwingenden Blättchen von der Größe der Lichtabsorption abhängt. Die Erregung eines Sehblättchens durch Lichtabsorption möchte ich der Bewegung einer sogenannten Glockentonne vergleichen; dies sind bekanntlich zur Andeutung des Fahrwassers angebrachte schwimmende Zeichen, bestehend aus einem Gerüste mit einer Glocke und zwei leicht bewegbaren Hämmern, die bei Seegang in Schwingungen gerathen und gegen die Glocke schlagen. Die Wellenbewegung des Wassers kann nur bewirken, dass die Glockentonne laütet; sie kann aber nicht die Tonhöhe verändern, denn die Glocke klingt immer nur in der ihr

eigenthümlichen constanten Stimmung. Analog dazu werde ich nicht annehmen müssen, dass ein Sehblättchen in seiner Gänze schwinge; es genügt auch, ähnlich der Glocke in der Glockentonne, die Schwingung gewisser in dem Sehblättchen enthaltener Molecüle. Das Licht wirkt hier nicht durch eine wohl charakterisierte Wellenlänge als solche, sondern durch den Anstoss überhaupt. Das Licht werde zunächst absorbiert, und die Molecularbewegung der Wärme erhöhe die Eigenschwingung der gewissen im Sehblättchen enthaltenen Molecüle.

Denkt man sich z. B. die Eigenstimmung der Sehblättchen p, g, b und a mit 468, 526·5, 585 und 624 Billionen angesetzt, entsprechend den Stimmungen n, $\frac{9}{8}$ n, $\frac{5}{4}$ n und $\frac{4}{3}$ n oder Prim, Secunde, Terz und Quart, so kann man die directe Mitschwingung der Sehblättchen mit vier aus etwa 400 Billionen Schwingungszahlen des Lichtes gänzlich vernachlässigen und alles auf Rechnung der durch Lichtabsorption erhöhten Wärme und dadurch erhöhten Eigenschwingung setzen.

Die Schwingung der Sehblättchen wird nun einerseits im Querschnitte, andrerseits im Längsschnitte fortgepflanzt werden. Im Querschnitte, wo die Mitschwingung wegen der ungleichen Stimmung der Sehblättchen ausgeschlossen ist, wird die Molecularbewegung der Wärme von Molecül zu Molecül fortschreitend immerhin von dem Erregungszustande eines Sehblättchens etwas an die anderen Sehblättchen mittheilen können, so dass diese in der ihnen eigenthümlichen Weise in geringem Grade erregt werden können. Das Licht selbst aber und die Eigenschwingung des ursprünglich und unmittelbar erregten Blättchens wird dabei keine Rolle spielen. Die molecular geleitete Wärme, welche hier allein wirksam ist, dürfte überhaupt in dieser Hinsicht von keiner Bedeutung sein. Es soll auch weiterhin damit nicht gerechnet werden; umsoweniger, als ja bei directem Einflusse des Lichtes auf den Sehfaden alle vier Sehblättchen zugleich beleuchtet werden. Im Längsschnitte des Sehfadens hingegen wird jedes erregte Sehblättchen alle benachbarten, weil sie gleich gestimmt sind, zur Mitschwingung anregen, und zwar durch

die Gleichheit der Stimmung, ohne auf die vermittelnde Leitung der Molecularbewegung der Wärme angewiesen zu sein. Die Miterregung wird im Längsschnitte eine viel grössere Geschwindigkeit haben. Die Sehblättchenreihe kann die ganze Länge des Sehfadens hindurch von einem identificierenden Netzhautpunkte zum anderen in Schwingung begriffen sein, was die binoculare Farbenmischung und das binoculare Einfachsehen zu erklären vermag. Die Intensität der schwingenden Bewegung wird jedoch an der Erregungsstelle am stärksten sein, und die Stelle des Erregungsmaximums in verschiedenen Tiefen der sehenden Netzhautschichte mag für das Tiefensehen von Bedeutung sein. [1])

Die Erregung des Sehfadens durch Licht ohne Mithilfe und in Abwesenheit von Sehstoffen reiche völlig aus, um die Empfindung des farblosen Lichtes (nicht des Weissen) und die Empfindung Schwarz, sowie die Empfindung der Übergänge von glanzlosem Schwarz durch glänzendes Schwarz und Silberglanz bis zum farblosen Lichte zu haben.

Sind alle Sehblättchen eines Sehfadens so gut wie in Schwingungsruhe, so sei diesem annähernden Ruhezustande gar keine optische Empfindung zugeordnet. Im traumlosen Schlafe sind wahrscheinlich alle Sehblättchen annähernd in Schwingungsruhe. Der allgemeine Chemismus der Lebensvorgänge reiche jedoch hin, um im wachen Zustande auch ohne Hilfe des Lichtes alle Sehblättchen in mäßige Schwingung zu versetzen. Die Amplituden seien in diesem Falle für alle homologen Punkte der Sehblättchen gleich groß und von mäßiger Größe. Diesem allgemeinen, jedoch schwachen Erregungszustande sei die Empfindung des *glanzlosen Schwarz* zugeordnet. Schwarz ist eine Empfindung, so positiv wie Roth oder Grün; diese positive Empfindung wird auch einem positiven Erregungszustande zugeordnet sein. Diese Empfindung wird am reinsten bei völligem Lichtabschluss zu haben sein. Diese Annahme wird man jedoch nur für solche Augen machen dürfen, welche keine Seh-

[1]) Die nähere Ausführung habe ich in der Schrift „Zur nativistischen Behandlung des Tiefensehens“, Leipzig und Wien 1892, zu geben versucht.

stoffe enthalten, die auch im Dunkeln die Sehfäden zu afficieren vermögen. Für das menschliche Auge wird man daher nicht behaupten können, dass die Empfindung des glanzlosen Schwarz am besten in dunklen Räumen entwickelt werde. Hering betont mit Recht, dass die Dunkelheit eines Dunkelzimmers dem tiefen Schwarz eines Sammtes in einem beleuchteten Zimmer nicht nahe kommt, und dass man nach längerem Aufenthalte in einem Dunkelzimmer alles Mögliche, nur kein reines Schwarz sieht. Die eigentliche Schwarz-Empfindung komme erst unter dem Einflusse des äußeren Lichtreizes zu Stande[1]). Die Richtigkeit dieses Satzes lässt sich gar nicht bezweifeln. Wieso der Lichtreiz die Empfindung Schwarz ermögliche, dies lässt sich in mehrfacher Weise zurechtlegen. Man kann nämlich auch annehmen, dass eine verdunkelte Netzhautstelle infolge der Beleuchtung anderer Stellen vorübergehend von Sehstoffen gereinigt werde, so dass diese Sehstoffe nicht mehr störend einwirken können und die verdunkelte Stelle der Netzhaut befähigt wird, die Empfindungsbedingung für glanzloses tiefes Schwarz zu sein. Die Mechanik dieser Sehstoff-Entfernung bedarf allerdings einer Ausführung, die später unter dem Gesichtspunkte des „Mitklingens“ gegeben werden soll.

Um den Erregungszustand der Sehblättchen zu veranschaulichen, wähle ich die Darstellung der Amplituden der schwingenden Theilchen an der Peripherie des Querschnittes des Sehfadens. Rollt man die Pheripherie des Querschnittes zu einer geraden Linie auf, nachdem die Kreislinie an einem beliebigen Punkte durchschnitten worden, und trägt man die Amplituden sinngemäß in der Abrollungsebene als Senkrechte auf die abgerollte Peripherie auf, so erhält man für kleine und in allen Sehblättchen gleiche Amplituden folgendes Schema:

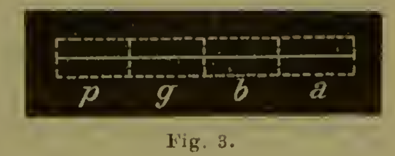


Fig. 3.

Aus dem Zustande der trägen Schwarzbewegung werde nun das Sehblättchen durch directe Beleuchtung ohne Mit-

[1]) Die Lehre vom Lichtsinne, vierte Mittheilung § 23.

wirkung der Sehstoffe, durch die Sehstoffe ohne Mitwirkung directer Beleuchtung oder aber endlich durch beides zugleich herausgebracht. Der erste Fall lässt sich auf Lebewesen anwenden, welche der Sehstoffe regelmässig entbehren und auf gewisse Fälle menschlicher Farbenblindheit; ausserdem wird sich theoretisch der Einfluss des Lichtes auf den Sehfaden nach Wegnahme der Mitwirkung der Sehstoffe auch für das normale menschliche Auge hypothetischer Weise construiren lassen.

Die Sehblättchen mögen nun die Eigenschaft haben, bei directer Beleuchtung das auf sie fallende Licht zu absorbieren und infolge dessen die Amplituden ihrer Eigenschwingungen zu vergrößern. Die Vergrößerung sei für alle vier Sehblättchen gleich. Die Structur der Sehblättchen schreibt ein Amplitudenmaximum vor, welches nicht ohne Zerstörung des Sehfadens überschritten werden kann. Dem Maximum dieser Erregung sei die intensivste Empfindung farblosen Lichtes zugeordnet. Graphisch lässt sich dieser Erregungszustand in folgender Weise (Fig. 4) veranschaulichen:



Fig. 4.

Zwischen diesem und dem Erregungszustande für glanzloses Schwarz (Fig. 3) sind beliebig viele Zwischenformen denkbar, welche durch Gleichheit der Amplitudengrößen für alle vier Sehblättchen ausgezeichnet sind. Diese Übergänge in den Erregungsformen mögen derjenigen Empfindungsmannigfaltigkeit zugeordnet sein, welche zwischen den Extremen glanzloses Schwarz und farbloses Licht ausgespannt ist, und in welcher beständige Übergänge von glanzlosem Schwarz durch glänzendes Schwarz und Silberglanz nach farblosem Lichte vorhanden sind.

Die directe Einwirkung des Lichtes auf die Sehblättchen sei sehr gering in Roth, Indigo und Violett; sie habe ihr Maximum in Grün ungefähr in E. Ein Auge, das über gar

keine Sehstoffe verfügt, würde demnach im Spectrum sehen, jedoch überall das gleiche farblose Licht (nicht Weiß) mit einem Maximum der Intensität ungefähr in E. Roth, Indigo und Violett würden fast schwarz gesehen werden.

Die directe Einwirkung des Lichtes setze eine gewisse nicht allzu niedrige Intensität des Lichtes voraus. Im reflectierten Lichte würden alle Gegenstände mit nicht spiegelnden Oberflächen glanzlos schwarz erscheinen. Es gäbe keine matten Pigmentfarben. Alle spiegelnden Oberflächen würden in farblosem Glanze gesehen werden in allen Graden des Überganges von glanzlosem Schwarz durch Schwarzglanz und Silberglanz bis nahezu zum farblosen Lichte. Alle leuchtenden Körper würden in gleich farblosem Lichte erstrahlen, soweit nicht die Einengung des Spectrums dem Sehen eine Grenze setzt.

Eine scheinbare Schwierigkeit bedarf noch der Erwähnung. Wenn die Sehfäden direct für Licht empfänglich sind, und die Fasern des nervus opticus gänzlich durchziehen, dann kann der Mariotte'sche Fleck, so scheint es wenigstens, nicht blind, oder doch nur wegen der Abwesenheit von Sehstoffen total farbenblind sein.

Diese scheinbare Schwierigkeit löse ich zunächst unter der Voraussetzung, der Mariotte'sche Fleck sei thatsächlich blind, indem ich annehme, dass die katoptrische Function der Plattenapparate der Stäbchen und Zapfen zur Erzeugung wirksamer Bildpunkte unerlässlich sei. Die Sehblättchen allein werden dann durch dioptrische Bildpunkte, die noch immer Zerstreuungskreise sind, nicht hinreichend stark erregt, also über den Schwarzzustand nicht hinausgebracht, wenn nicht das Licht zu einem katoptrischen Bildpunkte neuerdings concentriert wird. [1])

Aber auch ganz abgesehen von dieser Hypothese eines katoptrischen Netzhautbildes darf man die Frage aufwerfen, in welchem Sinne der Mariotte'sche Fleck blind genannt werden dürfe. Es ist außer allem Zweifel, dass ein auf dem

---

[1]) Stöhr, Zur nativistischen Behandlung des Tiefensehens, Leipzig und Wien, 1892.

Mariotte'sehen Fleeke entworfenes Bild nicht gesehen wird. In diesem Sinne ist diese Stelle blind. Aber, was könnte man überhaupt zu sehen erwarten, wenn der Mariotte'sehe Fleek nieht blind wäre? Doeh gewiss nicht das auf ihm entworfene Bild. Hier werden nämlich nieht nervöse Endglieder gereizt, sondern Opticusfasern in ihrem Verlaufe zwisehen dem Centralorgane und den Endapparaten, wenn aueh weit näher an diesen als am Centralorgan. Man wird also nach Analogien nur erwarten dürfen, dass in der Empfindung etwas Ähnliches auftreten wird, als ob die Endapparate gereizt worden wären. Die betreffenden gesehenen Minimen werden vielleicht andere als die gewöhnlichen Tiefenwerte haben, aber doch mindestens in denjenigen Visierlinien liegen, welche von den Stäbchen und Zapfen ausgehen. Man wird das aus Minimen zusammengesetzte Bild, welehes auf dem Mariotte'schen Fleck entworfen wird, im Sehfelde überall suehen dürfen, nur nieht an derjenigen Stelle, welche dem Mariotte'schen Flecke entspricht. Dieses Bild wird auf die Gesammtheit der Stäbchen und Zapfen aufgetheilt sein. Ist der Mariotte'sche Fleek total farbenblind und von nur sehwachem Sehvermögen, dann kann man von einer directen Beleuehtung des Fleckes kaum etwas anderes erwarten, als einen geringfügigen Zuwaehs des Gehaltes an farblosem Lichte zur Leistung eines jeden einzelnen Stäbchens und Zapfens. Ähnlieh ist die Frage, was ich zu sehen erwarten kann, wenn der den Mariotte'sehen Fleck unmittelbar umgebende schmale Ring der Endigungen beleuchtet wird. Ich suche mir zunächst für diese Verhältnisse eine synthetisehe Auffassung. Es wäre irgendwo in einer Netzhaut eine kreisrunde regelmäßig mit Endapparaten ausgefüllte Stelle. Jedem Endapparate entspreche ein Localwert, und die Orientierung der Endapparate in der Netzhaut stimme mit der Orientierung der Localwerte im Sehfelde zusammen. Nun denke ieh mir die Endapparate an dieser Netzhautstelle ganz bedeutend verkleinert und ohne Änderung der ihnen zugeordneten Localwerte vom Centrum dieser Stelle gegen die Peripherie derselben zu einem schmalen Kreisringe zusammengedrängt. Die

kleinen Volumina der verjüngten Endapparate und die groß gewordenen Zwischenräume gestatten eine solche Zusammendrängung. Die Netzhaut wäre nun im Centrum dieser Stelle perforiert und die perforierte blinde Stelle von einem sehenden Kreisringe umschlossen. Außerhalb dieses Kreisringes hat dann keine Contraction stattgefunden. Zwei Figuren, die man rechts und links von dem blinden Flecke anbringt, scheinen daher nicht genähert zu sein. Nichtsdestoweniger würde mit der perforierten Stelle nicht gesehen werden, und die letztere würde keinen Beitrag zur Ausfüllung des Raumes liefern. Die Ausfüllung würde von dem schmalen Ringe besorgt werden. Visible Minimen, welche zwei diametral entgegengesetzten Sehfäden der inneren Peripherie des Kreisringes entsprechen, würden in ihren Localwerten so unmittelbar aneinanderschließen als zwei andere Minimen, die aufeinanderfolgenden Sehfäden innerhalb des Kreisringes selbst entsprechen. Die Ausfüllung der Stelle des Mariotte'schen Fleckes wäre dann keine Sache der Phantasie oder gar eines den sinnlichen Eindruck ersetzenden Urtheilsactes, sondern eine reine Empfindungsangelegenheit.

In den vier Sehblättchen des Sehfadens liege nun die Fähigkeit zum Farbensehen. Das Farbensehen beruhe auf der ungleich starken Erregung der Sehblättchen. Weil aber die Sehblättchen unter dem directen Einflusse des Lichtes nach der eben gemachten Annahme immer ganz gleich stark erregt werden, so bedarf ich noch eines anderen hypothetischen Factors, welcher diese Ungleichmäßigkeit in der Erregung der Sehblättchen herausarbeitet. Zur Durchführung dieser Rolle wähle ich die Sehstoffe. Die vier Sehblättchen gleichen den Tasten einer Claviatur, welche durch das Licht allein alle zugleich und gleich stark wie mit einem Brette niedergedrückt werden. Die Sehstoffe gleichen den Fingern, deren jeder eine bestimmte einzelne Taste anschlägt.

Die Sehstoffe, deren ich für das menschliche (normale) Auge drei annehme, seien lösliche chemische Individuen, welche auf photochemischem Wege zersetzt werden. Der beständige Verbrauch von Sehstoffen weist darauf hin, dass

dieselben im Auge immer nacherzeugt werden. Man wird also außer den Sehstoffen auch Bildungsmaterial für dieselben anzunehmen haben.

Die Sehstoffe können auf den Sehfaden in dreierlei Weise wirken: durch ihre chemische Entstehung (Herings A-Process), durch ihre chemische Zersetzung (Herings D-Process) und endlich durch etwas Drittes, das zwischen Entstehung und Zersetzung zeitlich eingeschaltet ist. Ich nehme an, dass sowohl die Entstehung als die Zersetzung für die Empfindung bedeutungslos sei. Die Sehstoffe seien Körper, welche im Lichte entstehen und auch im Lichte zersetzt werden. In sehr geringen Lichtintensitäten finde eine Entstehung der Körper statt; diese Körper hätten die Fähigkeit, Licht zu absorbieren und infolge der Absorption in ihren molecularen Eigenschwingungen verstärkt zu werden. Bei mittleren Lichtintensitäten finde ebenfalls eine Entstehung der Körper statt; die Eigenschwingungen derselben im Lichte seien jedoch so lebhaft, dass diese Schwingungen, welche durch die fortdauernde Beleuchtung immer mehr verstärkt werden, nach längerer oder kürzerer Erregungszeit zur Zersetzung der Sehstoffmolecüle führen. Bei hohen Lichtintensitäten sei die Erregung der im Lichte gebildeten Sehstoffmolecüle so stark, dass die zwischen Entstehung und Zersetzung liegende Erregungszeit verschwindend klein wird. Das Bildungsmaterial für Sehstoffe wird in diesem Falle scheinbar direct in die Zersetzungsproducte der Sehstoffe überführt, während etwa von früherher aufgespeicherte Sehstoffe in diesen hohen Intensitäten zersetzt werden. Sieht man nur auf die factische Leistung, so kann man diese Verhältnisse kurz aber paradox so zusammenfassen: in sehr geringen Lichtintensitäten werden Sehstoffe nur gebildet; in sehr hohen werden sie nur zerstört; in den dazwischen liegenden Fällen wird die Bilanz bei niederen Intensitäten eine Vermehrung, bei hohen eine Verminderung des etwa vorhandenen Sehstoffvorrathes sein; in einem bestimmten Falle wird die Erzeugung der Sehstoffe der Zerstörung der neu erzeugten das Gleichgewicht halten, so dass zwar Erzeugung und Zerstörung stattfindet, aber

keine Aufspeicherung. Diese Annahme der Entstehung und Zersetzung der Sehstoffe im Lichte hat ihr Vorbild in dem thatsächlichen Verhalten des Chlorophylls in der Pflanze. [1]) Das Chlorophyll, dessen Function im Lichte für das Leben der Pflanze mindestens ebenso wichtig ist, wie die Function der Sehstoffe im Liehte für das sehende Lebewesen, entsteht im Lichte und wird im Lichte zersetzt. Aus dem Verhältnisse der Bildungsgeschwindigkeit zur Zersetzungsgeschwindigkeit erklärt sich die resultierende Zunahme und Abnahme des Chlorophyllgehaltes. Dieses Verhalten wird umso leichter verständlich, wenn man immer berücksichtigt, dass das Licht das Sehstoffmoleeül nicht direct zersetzt, sondern nur bildet. Das Molecül selbst erhöht dann durch Absorption des Lichtes seine Eigenschwingung. Wird diese Absorption lange fortgesetzt, oder ist das Licht sehr intentiv, so wird die Eigenschwingung des Molecüles so lebhaft, dass das Molecül sozusagen auseinanderschwingt oder sich selbst zersetzt.

Dieser Annahme von Schwingungen zwischen Entstehung und Zersetzung kann man gar nicht ausweichen, wenn man die Absurdität vermeiden will, die in der Annahme liegt, dass ein und derselbe Körper durch ein und dasselbe Licht zugleich und direct gebildet und zersetzt werde. Wenn nun diese Annahme unvermeidlich ist, so liegt es sehr nahe, die Empfindung nicht der Entstehung uud nicht der Zersetzung der Sehstoffmolecüle zugeordnet zu denken, sondern der Reizung der Sehblättchen durch den schwingenden Zustand der Sehstoffmolecüle.

Nimmt man an, dass die Sehstoffe unabhängig vom Lichte gebildet und im Lichte nur zersetzt werden, und dass die Empfindung der photochemischen Zersetzung als solcher zugeordnet sei, dann kommt man zu unhaltbaren Consequenzen. Morgens nach dem Erwachen müsste die ganze Welt in ein Meer von Farbe und Licht getaucht sein, um nach kurzer Zeit auf den für uns gewöhnlichen Stand der Dinge herabzusinken. Jeder längere Aufenthalt in einer

[1]) Vergl. den Artikel über Chlorophyll in Wiesner's Elemente der Botanik I, 3. Aufl. 1890.

Dunkelkammer müsste ein Mittel sein, dieses Schauspiel glühender Farbenpracht zur Wiederholung zu bringen. Vielleicht erträgt das Sehblättchen eine solche Erregung nicht, dann würden wir nicht bloß um das Schauspiel kommen, sondern auch erblinden; jedenfalls wäre das lange Schlafen eine äußerst gefährliche Sache. Man muss daher annehmen, dass die Sehstoffe, welche im Licht zersetzt werden, auch im Lichte gebildet werden, und dass das Licht sich die Sehstoffe, welche zum Sehprocesse nöthig sind, von Fall zu Fall im Augenblicke des Bedarfes (bildlich gesprochen) erst erzeugt.

Die mit Recht berühmte Hering'sche Hypothese theilt die Entstehungs- und Zersetzungsvorgänge auf verschiedene Wellenlängen des Lichtes auf. Vom Standpunkte dieser Hypothese ist die Annahme eines schwingenden Zustandes zwischen Entstehung und Zersetzung nicht unvermeidlich. Dagegen aber kann man das besonders verlockende empirische Vorbild des Chlorophylls nicht zur Construction einer Hypothese am Leitfaden der Analogie benützen.

Ich nehme nun an, dass sämmtliche Sehstoffe unter gewöhnlichen Verhältnissen nur im Lichte entstehen. Verschiedene Wellenlängen besorgen die Erzeugung eines und desselben Sehstoffes mit ungleicher Geschwindigkeit (zwei gleiche Ordinatenwerte einer nach zwei Seiten abfallenden Entstehungscurve ausgenommen). In einer und derselben Wellenlänge sei die Entstehungsgeschwindigkeit für verschiedene Sehstoffe auch bei gleichen Quanten der Bildungsmaterialien ungleich (die Schnittpunkte der Entstehungscurven ausgenommen). Die Entstehungsgeschwindigkeit sei von der Intensität des Lichtes abhängig und nehme mit der Intensität des Lichtes zu. Die Zahl der in der Zeiteinheit entstandenen Sehstoffmolecüle wird daher mit wenigen Ausnahmen nach Wellenlänge, Intensität, Sehstoff und verfügbarem Vorrath an Bildungsmaterial verschieden sein. Bei einem gewissen Intensitätsgrade verwandelt sich für eine bestimmte Wellenlänge und einen bestimmten Sehstoff der aufbauende Einfluss des Lichtes in einen zersetzenden, im Sinne der früheren Auseinandersetzung. Der Zersetzungsarbeit des Lichtes ist

insoferne eine Grenze gesetzt, als nicht mehr Sehstoff zersetzt werden kann als erzeugt worden ist. Die Erzeugung der Sehstoffe hat gleichfalls eine Grenze in der Geschwindigkeit, mit welcher das Bildungsmaterial für die Erzeugung der Sehstoffe an den Ort der Erzeugung herbeigeschafft wird. Überschreitet die Intensität des Lichtes diese Grenzen, so wird überschüssiges Licht da sein, welches aus Mangel an Material photochemisch nichts mehr leistet. Durch Erhöhung der Lichtintensität allein lässt sich daher der photochemische Process der Neubildung von Sehstoffen nicht steigern, wohl aber jeder Vorrath von Sehstoffen erschöpfen, während die directe Reizung des Sehfadens durch das Licht ungehindert fortschreitet, wodurch schließlich jede zugeordnete Empfindung in die Empfindung farblosen Lichtes übergehen muss. Bei zu großer Intensität der Beleuchtung wird der Bildpunkt zum buchstäblichen Brennpunkte und das im Brennpunkte gelegene Sehfadenstück wird versengt.

Jeder Sehstoff wird nun seine eigenartige Entstehungscurve haben, und jede Entstehungscurve erstrecke sich durch das ganze Spectrum. Die Wirksamkeit eines Sehstoffes auf den Sehfaden wird selbstverständlich von der Entstehungsgeschwindigkeit des Sehstoffes abhängen. Weil aber nach der Voraussetzung weder der Entstehung noch der Zersetzung der Sehstoffmolecüle Empfindung zugeordnet sei, so wird sich aus der Gestalt und dem Lagenverhältnisse der Entstehungscurven kein einfacher Schluss auf die Vertheilung der Farben im Spectrum ziehen lassen.

Jeder Sehstoff wird auch für eine gegebene Lichtintensität und ein gegebenes Quantum von Bildungsmaterial für diesen Sehstoff und ein gegebenes Quantum von vorräthigem Sehstoff seine eigenartige photochemische Zersetzungscurve haben. Auch die Zersetzungscurven mögen sich durch das ganze Spectrum hindurchziehen. Die Wirksamkeit eines Sehstoffes wird in hohem Grade von seiner Zersetzbarkeit abhängen. Ein Sehstoff, dessen Molecüle in einer bestimmten Wellenlänge sehr rasch zersetzt werden, daher nur kurze Zeit durch ihren schwingenden Zustand auf den Leitfaden wirken können,

wird in dieser Wellenlänge benachtheiligt sein. Weil man aber nicht wissen kann, bis zu welchem Grade der Nachtheil durch Lebhaftigkeit der Schwingung und Massenhaftigkeit der Neubildung ausgeglichen wird, so lässt sich aus der Gestalt und dem Lagenverhältnisse der photochemischen Zersetzungscurven kein einfacher Schluss auf die Empfindungsverhältnisse ziehen.

Das eigentlich wirksame an den Sehstoffmolecülen sei, wie gesagt, nicht deren Entstehung und nicht deren Zersetzung, sondern der schwingende Zustand zwischen beiden Vorgängen. Nicht so, dass dem schwingenden Zustande eines Sehstoffmolecüles als solchem Empfindung zugeordnet wäre, sondern so, dass ein jedes Sehstoffmolecül Eigenschwingungen besitzt, welche im ganzen Spectrum durch Lichtabsorption erhöht werden; jedes Sehstoffmolecül sei mit einem bestimmten Sehblättchen auf gleiche Eigenschwingungszahl gestimmt und dadurch befähigt, das Sehblättchen zur Mitschwingung zu bringen. beziehungsweise die bestehende Schwingung des Sehblättchens zu verstärken.

Die Fähigkeit der Sehstoffmolecüle, Licht zu absorbieren und dadurch in ihrer Eigenschwingung gekräftigt zu werden, wird in verschiedenen Wellenlängen für denselben Sehstoff ungleich sein (gleiche Ordinatenwerte einer nach zwei Seiten abfallenden Erregungscurve ausgenommen). In derselben Wellenlänge wird die Erregung verschiedener Sehstoffe ungleich sein (Schnittpunkte der Erregungscurven ausgenommen). Die Erregungscurve fällt mit der Zersetzungscurve nicht zusammen, weil es Molecüle geben kann, die lebhafter und lange dauernder Schwingungen fähig sind, bevor sie zersetzt werden, während andere Molecüle vielleicht nur einer geringen Beleuchtung bedürfen, um rasch zersetzt zu werden.

Ich nehme nun drei Sehstoffe an. Der erste, welcher nicht nach seiner Farbe, sondern nach seiner Bedeutung für das Sehen Purpurstoff heißen möge, sei bezüglich seiner Eigenschwingungszahl gleichgestimmt mit dem Sehblättchen p; der zweite, Gelbstoff, mit dem Sehblättchen g; der dritte, Blaustoff, mit dem Sehblättchen b. Dem vierten Sehblättchen

a entspreche kein Sehstoff. In Bezug auf diese Zugehörigkeit heiße nun das p-Sehblättchen auch Purpurblättchen, das g-Sehblättchen Gelbblättchen und das b-Sehblättchen Blaublättchen. Das vierte Sehblättchen, dem kein Sehstoff entspricht, und welches deshalb mit keinem Farbennamen bezeichnet werden kann, heiße das anonyme Blättchen.

Die Erregungscurven der vier Sehblättchen sind im Sinne der Hypothese bei Abwesenheit von Sehstoffen und bei directer Beleuchtung congruent. Die Erregungscurven der Sehstoffe seien nicht nur unter sich, sondern auch mit der Erregungscurve der Sehblättchen bei ausschließlicher Einwirkung directer Beleuchtung disgruent. In ein und derselben Wellenlänge wird daher jedes der drei Blättchen p, g und b von zwei Seiten her erregt werden: direct durch das Licht, und durch Mitschwingung mit dem gleichgestimmten Sehstoffmolecül, also indirect durch das Licht. Die Erregung des Purpurblättchens durch Licht wird durch die Erregung des Purpurstoffes infolge der Mitschwingung verstärkt werden; analog das Gelbblättchen und das Blaublättchen. Das anonyme Blättchen wird nur direct durch das Licht erregt. In einer bestimmten Wellenlänge wird ein bestimmter Sehstoff am stärksten, ein bestimmter anderer am schwächsten erregt sein und diese Erregung übertragen; ein dritter wird ein mittleres Verhalten zeigen (Schnittpunkte der Curven ausgenommen). Wird nun das p-Sehblättchen relativ am stärksten erregt, so entstehe in der Empfindung Purpurfarbe; der relativ stärksten Erregung des g-Blättchens entspreche Gelb, der relativ stärksten Erregung des b-Blättchens Cyanblau. Das anonyme Blättchen, welchem kein Sehstoff entspricht, wird niemals relativ stärker erregt sein. Das Auge wird für dieses Sehblättchen farbenblind sein.

Die Wirksamkeit der Sehstoffe auf die Sehblättchen wird eine zweifache sein: Herbeiführung einer ungleichen Erregung der Sehblättchen (oder Herbeiführung der Bedingung des Farbensehens und des Weißsehens) und Verstärkung der Einwirkung des Lichtes. (Weiß unterscheide ich durchgehends von dem farblosen Lichte.) Es ist naheliegend, dass mit

Sehstoffen begabte Lebewesen ceteris paribus bei niedrigeren Lichtintensitäten sehen können, bei welchen die directe Einwirkung des Lichtes auf die Sehfäden nicht mehr genügt. Die Eule besitzt wahrscheinlich Sehstoffe, worauf der Sehpurpur hindeutet. Das Huhn, welches in verhältnismäßig heller Dämmerung fast nicht mehr sieht, hat keinen Sehpurpur und wahrscheinlich auch keine Sehstoffe; es ist wahrscheinlich total farbenblind.

Die Wirksamkeit der Sehstoffe auf die Sehblättchen kann der Erregungscurve des Sehstoffmolecüles nicht so einfach entnommen werden. Es wirken hier viele Factoren zusammen: einmal die Menge des vorräthigen Bildungsmateriales, ohne welches das Licht keinen Sehstoff erzeugen kann; dann die Geschwindigkeit, mit welcher das Bildungsmaterial an den Ort der Erzeugung der Sehstoffe hinströmt; dann die Concentration, mit welcher das Bildungsmaterial am Orte des Verbrauches eintrifft; dann die Fähigkeit des Lichtes bestimmter Wellenlänge, aus diesem Materiale einen Sehstoff zu erzeugen; dann die Fähigkeit der Sehstoffmolecüle, das Licht dieser Wellenlänge zu absorbieren und mit der erhöhten Molecularbewegung auch die Eigenschwingung lebhafter zu machen; endlich die indirecte zersetzende Wirkung des Lichtes, indem die zu lebhafte Eigenschwingung der Sehstoffmolecüle zur Selbstzersetzung führt und dadurch die Einwirkung des Sehstoffes auf das Sehblättchen abschneidet. Dabei ist noch nicht der etwaige Vorrath von Sehstoffen infolge vorausgegangener Beleuchtung der Netzhaut berücksichtigt und von einer Möglichkeit der Störung der Processe unter sich und durch sich selbst abgesehen. Der eine Sehstoff wird in einer bestimmten Wellenlänge mehr durch eine große Zahl träge schwingender Molecüle wirken, die nur langsam oder gar nicht zersetzt werden und daher zum größten Theile nach Aufhören der Beleuchtung unzersetzt aufgespeichert werden; der andere Sehstoff durch eine kleine Zahl lebhaft schwingender Molecüle, die schnell zersetzt und schnell nachgebildet werden; ein dritter Sehstoff wird ein mittleres Verhalten zeigen. Dieses Verhältnis kann mit dem Wechsel der Wellenlänge selbst verändert werden.

Es wird daher am einfachsten sein, von der hypothetischen Construction von Entstehungs, Erregungs- und Zersetzungscurven für die Sehstoffe abzusehen und sich mit den Erregungscurven der Sehblättchen zu begnügen.

Betrachtet man einen bestimmten Punkt im schwingenden Sehblättchen p, und vergleicht man ihn mit den homologen Punkten in den Sehblättchen g, b und a, so wird man an der Amplitudengröße in p einen Antheil unterscheiden können, welcher der directen Einwirkung des Lichtes entspricht und einen Zuwachs, welcher der Einwirkung sämmtlicher Molecüle des Purpurstoffes zuzuschreiben ist. In dieser Weise kann man, allerdings nur zum Zwecke der anschaulichen Exemplification, die Amplitudengröße der schwingenden Punkte in den Sehblättchen zum Gegenstande einer vergleichenden Darstellung machen. Die complicierten Ursachen bleiben alle draußen, und nur die Endwirkung, die Amplitudengröße, wird festgehalten. Die Empfindung sei nun nach Intensität, und Qualität der Amplitudengröße und Sehblättchenart (oder Schwingungszahl) direct proportioniert. Der Zuwachs zu der von directer Beleuchtung allein abhängigen Amplitudengröße kommt bei jedem Sehblättchen ausschließlich auf Rechnung einer einzigen gleichgestimmten Sehstoffart. Die direct proportionierte Zuordnung kann ich deshalb annehmen, weil es sich nicht um das Verhältnis des ersten Reizes zur letzten Erregung des Sehfadens und auch nicht um die Zuordnung des ersten Reizes zur Empfindung handelt. Das Fechner'sche psychophysische Gesetz, sagt Mach, „gilt nicht für die Beziehung von Reiz und Nervenerregung im einfachen Nerv, auch nicht für die Beziehung von Nervenerregung und Empfindung im einfachen Nerv. Es gilt für die Beziehung des ersten Reizes zur letzten Nervenerregung, mit welcher die bewusste Empfindung geht, und zwar deshalb, weil die Erregung im Sinnesorgane durch ein compliciertes Gewebe von Nerven durchfiltriert wird.“ [1])

---

[1]) Mach, Über die physiologische Wirkung räumlich vertheilter Lichtreize. Sitzungsber. d. W. Ak. d. W. 1868, 57. Band, 2. Abth. S. 12.

Die Wirksamkeit der Sehstoffe für das Farbensehen beruhe nun darauf, dass die Verstärkung der Schwingungen der Sehblättchen in einer und derselben Wellenlänge durch verschiedene Sehstoffe ungleich sei, und auch ungleich bezüglich desselben Sehstoffes und desselben Sehblättchens in verschiedenen Wellenlängen. Vermöge der Ungleichheit des Zuwachses zur Amplitudengröße werden nun die Erregungscurven der Sehblättchen bei Anwesenheit von Sehstoffen aufhören, congruent zu sein. Zum Ausdrucke der Erregung des Sehblättchens kann man die in einer bestimmten Richtung genommene Amplitude eines bestimmten schwingenden materiellen Punktes des Sehblättchens benutzen. Die Bedingung des Farbensehens ruht in dem Sehfaden selbst; weil aber das Licht ohne Mitwirkung der Sehstoffe sozusagen alle Tasten der Claviatur immer zugleich anschlägt, so kann es nur eine einzige Erregungsform herbeiführen, welcher die Empfindung des farblosen Lichtes zugeordnet ist, und keine jener anderen Erregungsformen herausarbeiten, welche in einer ungleichmäßigen Vertheilung der Erregung auf die Sehblättchen bestehen und welchen die anderen Empfindungen zugeordnet sind.

Ich wende mich zunächst dem Purpurstoffe zu. Die Molecüle des Purpurstoffes sollen die Fähigkeit haben, innerhalb des ganzen Spectrums Licht zu absorbieren und dadurch ihre Eigenschwingung zu verstärken. Die Absorption sei in verschiedenen Wellenlängen ungleich stark. Das p-Sehblättchen werde durch die Schwingung des Purpurstoffmolecüles in Mitschwingung versetzt, oder wenn es schon schwingt, in seiner Schwingung verstärkt. Die Eigenschwingung des Purpurstoffmolecüls sei daher gleichgestimmt mit jener des p-Sehblättchens. Die Schwingungszahl sei beispielshalber 468 Billionen. Das Maximum der Einwirkung des Purpurstoffes auf das Purpurblättchen sei in Roth hart an der Grenge von Orange. Der Erregung des p-Sehblättchens sei eine hyoothetische Empfindung zugeordnet, welche, wenn der Sehfaden nur ein einziges Sehblättchen besäße und dieses ein p-Blättchen wäre, in die Empfindung gebracht werden

könnte und große Ähnlichkeit mit Purpur hätte. Es würde jedoch jede Spur von Helligkeit und Glanz fehlen. Diese hypothetische Empfindung nenne ich die *Grundfarbe Purpur*. Weil es aber nicht gelingt, das Purpur-Sehblättchen und den Purpur-Sehstoff zu isolieren, so ist die Grundfarbe Purpur keine Empfindungsthatsache, sondern eine Hypothese, und zwar die Hypothese einer bestimmten potentiellen Farbenempfindung. Die Grundfarbe Purpur ist der empirisch darstellbaren Purpurfarbe ähnlich und in einer gewissen Nuance sogar qualitativ ganz gleich; sie ist jedoch absolut gesättigt zu denken. Ein Auge, das nur über Purpurstoff und ein Purpur-Sehblättchen verfügt, würde im ganzen Spectrum sehen, jedoch überall nur gesättigtes glanzloses Purpur mit dem Maximum der Intensität (im Sinne des hier festgehaltenen Beispieles) an der Grenze von Roth und Orange. Ein Auge, das nur Purpurstoff, aber vier Sehblättchen besitzt, würde die Fähigkeit, farbloses Licht zu empfinden, mit der Fähigkeit, Purpur zu sehen, mischen, und daher auch im ganzen Spectrum Purpur sehen, jedoch helles, leuchtendes Purpur. Die empirisch darstellbare Empfindung Purpur ist einer Erregungsform zugeordnet, in welcher auch die Schwingungen des Gelb- und des Blaublättchens relativ zum anonymen Blättchen verstärkt sind und nur diejenigen des Purpurblättchens überwiegen.

Die Molecüle des Gelb-Sehstoffes sollen in analoger Weise die Fähigkeit haben, innerhalb des ganzen Spectrums Licht zu absorbieren und dadurch ihre Eigenschwingung zu erhöhen. Das Gelb-Sehblättchen werde dadurch in Mitschwingung versetzt, beziehungsweise in seiner Schwingung gefördert. Die Eigenschwingung des g-Sehblättchens sei also mit jener des Gelbstoffmolecüles gleich gestimmt und beispielshalber 526·5 Billionen; sie verhalte sich zu jener des Purpurblättchens wie $\frac{9}{8}$ n zu n oder wie die Secunde zur Prim. Wäre es möglich, das g-Sehblättchen (welches nicht selbst gelb ist oder gelb sein muss) im Sehfaden zu isolieren, so wäre der Erregung des g-Blättchens eine Empfindung zugeordnet, welche dem neutralen zwischen Orangegelb und Grünlichgelb lie-

genden Gelb ähnlich und in einer gewissen Nuance qualitativ gleich, jedoch absolut gesättigt ohne Helligkeit und ohne Glanz ist. Diese hypothetische Empfindung nenne ich die Grundfarbe Gelb. Ein Auge, das nur g-Sehblättchen enthielte, würde im ganzen Spectrum sehen, jedoch in allen Wellenlängen den gleichen neutralgelben Farbenton. Das Maximum der Intensität läge in der Nähe von E. Würde aber außerdem dieses Auge noch Gelbstoff enthalten, so käme die Einwirkung dieses Stoffes auf das Sehblättchen in Geltung. Das Gelbblättchen würde nicht mehr wie jedes andere Sehblättchen das Maximum der Intensität nahe bei E haben, sondern wo anders, zum Beispiele in Orange zwischen C und D. Dieses Gelb wäre absolut gesättigt, ohne Helligkeit und Glanz. Das Vorhandensein der vier Sehblättchen und eines Sehstoffes. und zwar des Gelbstoftes, würde die Fähigkeit, farbloses Licht zu sehen, mit der Fähigkeit, Gelb zu sehen mischen, so dass jeder Wellenlänge gelbes Licht oder leuchtendes Gelb, zum mindesten aber gelbe Farbe mit einem gewissen Gehalte an Glanz (nicht Weiß) zugeordnet wäre. Das empirische Neutralgelb, welches sowohl als gelbes Licht wie als glanzloses Pigmentgelb dargestellt werden kann, setzt bereits voraus, dass nicht bloß das Gelbblättchen, sondern auch das Purpur- und das Blaublättchen relativ stärker erregt werden als das anonyme Blättchen. Das Grundfarbe-Gelb bleibt für das menschliche Auge eine hypothetische potentielle Empfindung.

Außer dem Purpur- und dem Gelbstoffe nehme ich noch einen Blaustoff an. Die Molecüle des Blaustoffes hätten die Fähigkeit, innerhalb des ganzen Spectrums Licht zu absorbieren und dadurch ihre Eigenschwingung zu erhöhen. Das Blaublättchen habe bei directer Einwirkung des Lichtes in Abwesenheit des Blau-Sehstoffes sowie jedes andere Sehblättchen das Maximum der Erregung nahezu in E. Durch den Zuwachs der Erregung infolge der Mitschwingung mit dem Blaustoffmolecüle und infolge dessen, dass das Maximum der Erregung des Blaustoffmolecüles nicht auch nahezu in E liegt, werde das Maximum der Erregung des Blaublättchens bei Mitwirkung des Blaustoffes nach Gelb in die Nähe

von D verschoben. Diejenige Empfindung, welche der Erregung des Blaublättchens in Abwesenheit anderer Sehblättchen zugeordnet wäre, nenne ich die G r u n d f a r b e C y a n b l a u. Diese Farbe kann aber nicht in die Empfindung gebracht werden. Sie bleibt hypothetisch potentiell. Das empirisch darstellbare Cyanblau setzt immer schon im Sinne dieser Hypothese nicht nur die Mitwirkung, sondern auch eine ungleichmäßige Mitwirkung der anderen drei Sehblättchen voraus. Ein Auge, das nur über Blaustoff und über alle vier Sehblättchen verfügte, würde im ganzen Spectrum sehen, jedoch überall nur Blau. Im Gegensatze dazu wäre nur die Schwarzempfindung herauszuarbeiten; das Blau wäre in verschiedenen Graden des Gehaltes an farblosem Lichte darstellbar.

Dem vierten oder anonymen Sehblättchen sei kein Sehstoff zugeordnet; die Leistung dieses Blättchens geht für das Farbensehen verloren, weil es niemals relativ stärker erregt werden kann als ein anderes. Das menschliche Auge sei für diese vierte anonyme Farbe blind. Die Annahme dieses Sehblättchens hat aber den Sinn, der Empfindung des farblosen Lichtes eine physiologische Zuordnung hypothetisch zu geben. Man könnte zwar sagen, diese Empfindung sei der gleichmäßigen Erregung der drei ersten Sehblättchen zugeordnet. Diese Combination spare ich mir jedoch für die Empfindung des glanzlosen Weiß auf.

Dadurch, dass die Erregung des Sehblättchens, wie sie durch den gleichnamigen Sehstoff allein ohne directe Einwirkung des Lichtes auf das Sehblättchen stattfinden müsste, im Spectrum einen ganz anderen Curvenverlauf und einen anderen Ort für das Maximum hat, als wenn das Licht direct ohne Mithilfe des Sehstoffes einwirkte, und ferner dadurch, dass die Erregung der verschiedenen Sehblättchen, soweit der Antheil der Sehstoffe in Betracht kommt, auch wiederum ungleiche Curvenformen im Spectrum und verschiedene Stellen der Maxima hat, wird die Congruenz der Curven der Erregung der Sehblättchen, wie sie bei Abwesenheit der Sehstoffe bestünde, aufgehoben, und damit die Bedingung für das Farbensehen wie für das Weißsehen geschaffen.

Außerdem wird die Erregung der Sehblättchen verstärkt, so dass die Sehstoffe möglicher Weise die Bedingung dafür sind, dass nicht glänzende farbige Körper überhaupt farbig gesehen werden, und nicht unterschiedslos als schwarz erscheinen. Die Sehstoffe ermöglichen es vielleicht auch, dass noch in der Dämmerung Farben gesehen werden.

Treffen nun alle drei Sehstoffe in einem Auge zusammen, so wirkt jeder Sehstoff nur auf das mit ihm gleichgestimmte Sehblättchen. Der Sehstoff ist zum Sehblättchen correlativ gedacht. Ein chemischer Körper, welcher für das Auge einer bestimmten Art ein Sehstoff ist, weil er die passende Eigenschwingung hat, wäre dann für ein anders beschaffenes Auge kein Sehstoff. Im Sinne der hier construirten Hypothese werde nun in jeder Wellenlänge des Spectrums das Purpur-, Gelb- und Blaublättchen durch Sehstoffe erregt, jedoch in jeder Wellenlänge in anderen Verhältnissen. Die Erregung durch die Sehstoffe sei nur ein Zuwachs zur Erregung durch die directe Beleuchtung, auf welch letztere das anonyme Blättchen allein angewiesen bleibt. Jede Farbenempfindung wird daher einer Erregungsform zugeordnet zu denken sein, welche sich aus der Erregung aller vier Seeblättchen zusammensetzt. Nicht die Zahl der erregten Sehblättchen, sondern nur das Verhältniss der Erregungen einer constanten Zahl von Sehblättchen mache den Unterschied in den Bedingungen für die Licht- und Farbenempfindungen aus.

Das Purpurblättchen habe z. B. die Eigenschwingungszahl 468, das Gelbblättchen 526·5, das Blaublättchen 585 und das anonyme Blättchen 624 Billionen. Die Schwingungszahlen mögen sich demnach verhalten wie $1 : \frac{9}{8} : \frac{5}{4} : \frac{4}{3}$ oder wie Grundton zu Secunde, Terz und Quart. Der gleich starken Erregung aller Sehblättchen sei die Empfindung des farblosen Lichtes zugeordnet.

Sobald von dieser gleichmäßigen Erregung abgegangen wird, sei eine Bedingung für eine andere als diese Empfindung geschaffen.

Es sei der directe Einfluss des Lichtes auf den Sehfaden verschwindend klein, hingegen die Erregung der Sehblättchen

durch alle drei Sehstoffe so stark, als sie überhaupt nur sein kann, ohne dass die directe Einwirkung des Lichtes auf die Sehblättchen eine erhebliche Größe annimmt. Die Erregung der Sehblättchen p, g und b sei gleich groß, die Amplitude des anonymen Sehblättchen bleibt, weil ein entsprechender Sehstoff mangelt, auf der Höhe der Schwarzschwingung.

Dieser Erregungsform sei die Empfindung glanzloses Weiß (Kreideweiß) zugeordnet.

Diese Empfindung ist nur bis zu einer gewissen nicht allzu hohen äußeren Lichtintensität möglich. Die directe Einwirkung des Lichtes auf den Sehfaden, welche neben der Erregung des Sehfadens durch die Sehstoffe einhergeht, bringt auch das anonyme Sehblättchen über den Zustand der Schwarzschwingung hinaus, wodurch bei Steigerung der äußeren Lichtintensität das glanzlose Weiß (Kreideweiß) in eine zwischen diesem und farblosem Lichte in der Empfindungsmannigfaltigkeit gelegenen Empfindung, dem glänzenden Weiß (Schneeweiß, Schneeglanz) und schließlich in farbloses Licht übergeht. Das glanzlose Weiß lässt sich am besten in von matten Flächen reflectiertem Lichte entwickeln.

Das glänzende Weiß, das leuchtende Weiß, welches gewöhnlich als ein Empfindungsgemenge behandelt wird, lässt sich ungezwungen als eine einheitliche Empfindung auffassen, welche zwischen dem glanzlosen Weiß und dem farblosen Lichte gelegen ist, und alle Übergänge zwischen diesen Extremen darstellt. Die Erregungsform für glanzloses Weiß lässt sich beispielsweise illustrieren:

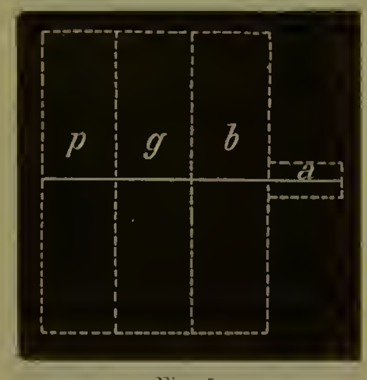


Fig. 5.

Anders verhält es sich mit der physikalischen Bedingung für glänzendes Weiß und glänzende Farben überhaupt. Es kann sehr wohl eine spiegelnde Fläche unterschieden werden, welche, allein wirksam, die Empfindung des farblosen Lichtes bedingen würde, und eine andere, tieferliegende, welche, allein

wirksam, die Empfindung des glanzlosen Weiß bedingen könnte. Wirken beide Flächen zusammen, so mischen sie ihre Einwirkung auf die Netzhaut; sie erzeugen eine einheitliche Erregungsform des Sehfadens, welche nicht im mindesten complicierter sein muss, als diejenige für glanzloses Weiß oder für farbloses Licht.

Die Erregung der Sehblättchen wird eine gewisse Grenze nicht überschreiten können, welche durch den molecularen Zusammenhang vorgeschrieben ist; eine hinreichend starke Reizung über diese Grenze hinaus könnte nur die Zerstörung des Sehfadens zur Folge haben. Wird daher diese Grenze durch directe Einwirkung des Lichtes erreicht, so können die Sehstoffe die Erregungsverhältnisse der Sehblättchen nicht mehr verschieben. Bei sehr großer Lichtintensität geht jede Empfindung in diejenige des farblosen Lichtes über. In diesem Sinne entspricht die Empfindung des glanzlosen Weiß der lediglichen und gleich starken Einwirkung aller drei Sehstoffe, und die Empfindung des farblosen Lichtes der lediglichen directen Einwirkung des Lichtes auf alle vier Sehblättchen.

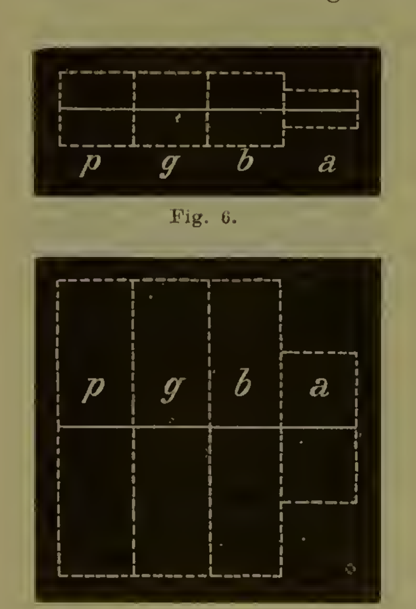


Fig. 6.

Fig. 7.

Sinkt die äußere Lichtintensität so, dass die Erregungen des Purpur-, Gelb- und Blaublättchens unter Wahrung der Gleichheit der Amplituden sich dem Schwarzzustande nähern, so sei diesen Erregungsformen die Empfindungsmannigfaltigkeit zwischen glanzlosem Weiß und glanzlosem Schwarz oder die Mannigfaltigkeit des ungetönten Grau zugeordnet. (Fig. 6.)

Das glänzende Weiß lässt sich in einem aus der Mannigfaltigkeit herausgegriffenen Elemente in folgender Weise (Fig. 7) illustrieren:

Aus der Betrachtung der hypothetischen Erregungsform für farbloses Licht (Fig. 4 Seite 12) und derjenigen für

glanzloses Weiß (Fig. 5 Seite 29) ergibt sich, dass jede dieser Erregungsformen in ihrer eigenthümlichen Art dem Zustande der trägen Schwarzschwingung (Fig. 3 Seite 11) entgegensinken kann. Dieser Verschiedenheit der Erregungsformen entspricht eine Empfindungsmannigfaltigkeit zwischen den drei Extremen: glanzloses Scnwarz, glanzloses Weiß und farbloses Licht. Zwischen den beiden ersten Extremen liegen die verschiedenen Grade von glanzlosem und farblosem (ungetöntem) Grau; zwischen dem ersten und dritten Extreme liegt das glänzende Schwarz und der Silberglanz; zwischen dem zweiten und dritten Extreme liegt das glänzende Weiß (Schneeweiß). Zwischen allen drei Extremen zugleich liegen entsprechende Empfindungen.

In die Empfindung komme nun ein größerer Reichthum dadurch, dass auch den ungleich starken Erregungen der Sehblättchen besondere Farbenempfindungen zugeordnet sind.

Es seien z. B. das Purpur-, Gelb- und Blaublättchen stärker erregt als das anonyme Blättchen, jedoch nicht alle unter einander gleich stark. Die Amplituden seien nur für das Purpur- und das Blaublättchen gleich, für das Gelbblättchen jedoch größer:

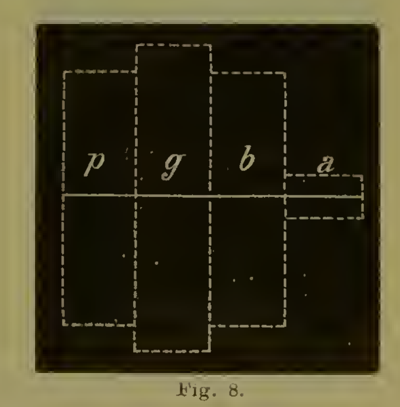


Fig. 8.

Dieser Erregungsform (Fig. 8) sei die Empfindung des neutralen Gelb zugeordnet. Die relative Erregung des anonymen Blättchens sei dafür entscheidend, ob das neutrale Gelb glanzlos gesehen wird, oder glänzend, oder als gelbes Licht. Steigt die Erregung des Purpurblättchens, oder sinkt die Erregung des Blaublättchens, so gehe die Empfindung des neutralen Gelb in diejenige des nach Orange sich neigenden Gelb über; in analoger Weise sei die Veränderung des neutralen Gelb nach Grünlichgelb bedingt.

Es wird aber auch Fälle geben, in welchen sämmtliche Sehblättchen ungleich stark erregt sind; ein solcher Fall sei z. B. die Zuordnung zu Roth. Der gleich starken Erregung

des Purpur- und Gelblättchens bei minder starker Erregung des Blaublättchens sei die Empfindung einer Farbe zugeordnet, welche das Grenzelement zwischen Roth und Orange sein möge. Steigt die Erregung des Purpurblättchens, oder sinkt die Erregung des Gelbblättchens, so gehe diese an der Grenze liegende Empfindung zunächst in das eigentliche Roth über; erst bei noch weiterer Verstärkung der Erregung des Purpurblättchens gehe Roth in Rothpurpur über, und schließlich bei gleich starker Erregung des Gelb- und des Blaublättchens bei stärkerer Erregung des Purpurblättchens in neutrales Purpur über. Ein aus der Roth-Mannigfaltigkeit herausgegriffenes Element lässt sich zum Beispiele folgender Weise (Fig. 9) illustrieren:



Fig. 9.

Von den Größenverhältnissen der Amplituden der Sehblättchen untereinander hänge nun Farbe und Farbenton in der Empfindung ab.

Die Sehstoffe, welche nach der Hypothese die Ungleichmäßigkeit in der Erregung der Sehblättchen herbeiführen, ermöglichen dadurch das Farbensehen und das Weißsehen.

Den Farben und Farbentönen sowie dem Weiß werden Über- und Unterordnungsverhältnisse sowie Gleichheitsverhältnisse der Erregungen des Purpur-, Gelb- und Blaublättchens entsprechen.

Sind die Amplituden der homologen Punkte dieser Sehblättchen gleich groß, so bezeichne ich dies durch Nebeneinanderstellung der Buchstaben:

P G B.

Diesem Verhältnis entspreche die Empfindungszuordnung Weiß. Sind die an den Amplituden gemessenen Erregungen bei zwei Sehblättchen gleich, die Erregung des dritten Blättchens kleiner, beziehungsweise größer, so schreibe ich den

Buchstaben des dritten Blättchens darunter, beziehungsweise darüber:

PG	GB	PB	P	G	B
B	P	G	GB	PB	PG

Den Fällen der Gleichheit zweier Erregungen sollen Empfindungen entsprechen, welche den oben angeführten Combinationen von links nach rechts folgend, lauten: Grenzpunkt zwischen Roth und Orange, Grenzpunkt zwischen Grün und Blaugrün, Grenzpunkt zwischen Indigo und Violett, neutrales Purpur, neutrales Gelb, neutrales Cyanblau.

Sind die Erregungen durchaus ungleich, so schreibe ich den Buchstaben des Blättchens mit der größten Amplitude oben und denjenigen des Blättchens mit der kleinsten unten:

P	P	G	G	B	B
B	G	P	B	G	P
G	B	B	P	P	G

Die Erregungsverhältnisse orientiere ich nun zu den Farbennamen in der folgenden Tabelle, in welcher „Übergewicht von x über z zum Übergewichte von y über z" heißen soll: die Differenz der Amplitudengröße eines bestimmten im Sehblättchen schwingenden Theilchens über die Amplitudengröße des im Sehblättchen z homologen schwingenden Theilchens verhält sich zur Differenz der Amplitudengröße des im Sehblättchen y homologen schwingenden Theilchens über die Amplitudengröße des im Sehblättchen z homologen schwingenden Theilchens, wie A zu B.

Neutrales Purpur: das Übergewicht von Purpur über Gelb verhält sich zum Übergewichte von Purpur über Blau wie 1 : 1.

Rothpurpur: das Verhältnis des Übergewichtes von Purpur über Blau zum Übergewichte von Gelb über Blau liegt zwischen den Grenzen 1 : 0 und 1 : 0·5.

Roth: das Verhältnis des Übergewichtes von Purpur über Blau zum Übergewichte von Gelb über Blau liegt zwischen den Grenzen 1 : 0·5 und 1 : 1.

Orange: das Verhältnis des Übergewichtes von Gelb über Blau zum Übergewichte von Purpur über Blau liegt zwischen den Grenzen 1 : 1 und 1 : 0·5.

(Nach Orange neigendes) Gelb: das Verhältnis des Übergewichtes von Gelb über Blau zum Übergewichte von Purpur über Blau liegt zwischen den Grenzen 1 : 0·5 und 1 : 0.

Neutrales Gelb: das Übergewicht von Gelb über Purpur verhält sich zum Übergewichte von Gelb über Blau wie 1 : 1.

(Nach Grün neigendes) Gelb: das Verhältnis des Übergewichtes von Gelb über Purpur zum Übergewichte von Blau über Purpur liegt zwischen den Grenzen 1 : 0 und 1 : 0·5.

Grün: das Verhältnis des Übergewichtes von Gelb über Purpur zum Übergewichte von Blau über Purpur liegt zwischen den Grenzen 1 : 0·5 und 1 : 1.

Blaugrün: das Verhältnis des Übergewichtes von Blau über Purpur zum Übergewichte von Gelb über Purpur liegt zwischen den Grenzen 1 : 1 und 1 : 0·5.

(Nach Blaugrün neigendes) Cyanblau: das Verhältnis des Übergewichtes von Blau über Purpur zum Übergewichte von Gelb über Purpur liegt zwischen den Grenzen 1 : 0·5 und 1 : 0.

Neutrales Cyanblau: das Übergewicht von Blau über Purpur verhält sich zum Übergewichte von Blau über Gelb wie 1 : 1.

(Nach Indigo neigendes) Cyanblau: das Verhältnis des Übergewichtes von Blau über Gelb zum Übergewichte von Purpur über Gelb liegt zwischen den Grenzen 1 : 0 und 1 : 0·5.

Indigo: das Verhältnis des Übergewichtes von Blau über Gelb zum Übergewichte von Purpur über Gelb liegt zwischen den Grenzen 1 : 0·5 und 1 : 1.

Violett: das Verhältnis des Übergewichtes von Purpur über Gelb zum Übergewichte von Blau über Gelb liegt zwischen den Grenzen 1 : 1 und 1 : 0·5.

(Nach Violett neigendes) Purpur: das Verhältnis des Übergewichtes von Purpur über Gelb zum Uebergewichte von

Blau über Gelb liegt zwischen den Grenzen 1 : 0·5 und 1 : 1, womit die Tabelle wieder zu ihrem Anfange zurückkehrt.

Durch die Angabe der Permutation einer Farbenempfindungsbedingung aus den Elementen P, G und B, und durch Einsetzung von ziffermässigen Werten in das einzelne Verhältnis ist ein Farbenton eindeutig bestimmt.

Der Helligkeitsgrad einer glanzlosen oder matten Farbe ist mit dem relativen Weißgehalte derselben identisch. Unter dem absoluten Weißgehalte verstehe ich nicht die Menge eines specifischen zersetzten Weiß-Stoffes, noch auch die Schwingung eines besonderen Weißblättchens. Ich kann mir jeden Erregungszustand, der eine Farbenempfindung bedingt, aus dem Weißzustande durch Zuwachs zu einer oder zu zwei Sehblättchenerregungen enstanden denken. Ist das Ausmaß der Erregung für das am wenigsten erregte Sehblättchen (und es sollen nach der Hypothesen in normalen Augen immer drei zugleich durch Sehstoffe erregt werden) $= x$, so ist der Ausdruck für den absoluten Weißgehalt $= 3\,x$. Setzt man diesen Betrag in ein Verhältnis zu dem Ausdrucke für die Gesammterregung, so erhält man den Ausdruck für den relativen Weißgehalt oder den Helligkeitsgrad einer glanzlosen Farbe. Die Gesammterregung setzt sich zusammen aus der kleinsten Erregung x, aus der größten Erregung $x + \triangle$, und aus der mittleren $x + \triangle'$, welche auch $= x$ sein kann, und endlich aus der Schwarzschwingung s des anonymen Blättchens.

Wird aber eine Farbe glänzend, oder nähert sie sich durch farbiges Licht dem farblosen Lichte, dann kann man den Helligkeitsgrad nicht mehr mit dem relativen Weißgehalte gleichsetzen. Der Weißgehalt spielt auch dann noch eine wichtige Rolle, aber er theilt sich in diese mit dem relativen Gehalte an farblosem Lichte. Man kann eine Erregungsform construieren, bei welcher die Erregung des anonymen Blättchens zwar den Schwarzzustand weit hinter sich hat, aber dennoch unter den vier Erregungen die kleinste ist. Ist das Ausmaß der Erregung des anonymen Blättchens y, so ist der absolute Gehalt an farblosem Lichte $= 4\,y$. In

3*

diesem Falle gibt es außerdem einen Gehalt an glanzlosem Weiß, der sich mit dem Gehalte an farblosem Licht zum absoluten Helligkeitsgehalte addiert. Der absolute Weißgehalt wird dann, wenn das Ausmaß der Erregung des am wenigsten stark durch Sehstoff erregten Blättchens = x, mithin die Differenz über y = x — y ist, gleich 3 (x—y) sein. Der absolute Helligkeitsgehalt ist dann die Summe von 4 y und 3 (x—y). Diese Exemplification setzt voraus, dass die Erregung an der Amplitudengröße selbst und unmittelbar gemessen werde. Setzt man diesen absoluten Gehalt in ein Verhältnis zu Gesammterregung so erhält man einen Ausdruck für den relativen Helligkeitsgehalt, der sich aus dem Weißgehalte und dem Gehalte an farblosem Lichte zusammensetzt.

Statt nun den absoluten Weißgehalt und den absoluten Gehalt an farblosem Lichte in ein Verhältnis zur Gesammterregung zu setzen, kann ich den Überschuss über den Weißgehalt in ein Verhältnis zur Gesammterregung setzen; dadurch erhalte ich die relative Bestimmung des Farbengehaltes oder den *Sättigungsgrad* einer Farbe. Ist der absolute Weißgehalt sowie auch der Gehalt an farblosem Lichte sehr gering, und gleichzeitig der Überschuss über den Weißgehalt sehr gering, so ist der Sättigungsgrad gleichfalls niedrig; die Farbe erscheint dann sozusagen mit Schwarz verdünnt; sie kann aber unter anderen Verhältnissen auch mit Grau, mit Weiß und mit farblosem Lichte verdünnt sein. Verringerung der Sättigung ist begrifflich nicht identisch mit Aufhellung.

So gut man vom Weißgehalte und dem Gehalte an farblosem Lichte sprechen kann, deren relative Bestimmung den Helligkeitsgrad ausmacht, so gut kann man von einem absoluten Schwarzgehalte sprechen, dessen relative Bestimmung den *Dunkelheitsgrad* ausmacht, ohne einen specifischen Schwarzstoff oder ein specielles Schwarzblättchen annehmen zu müssen. Man kann jede Farben- und Lichtempfindung einer Erregungsform zugeordnet denken, welche durch Vergrößerung der Amplituden aus der Erregungsform für Schwarz entstanden ist. Setzt man den Ausdruck für die Schwarzerregung in ein Verhältnis zum Ausdrucke für

die Gesammterregung, so ergibt sich damit der Ausdruck für den Dunkelheitsgrad.

Der Sättigungsgrad, Helligkeitsgrad und Dunkelheitsgrad einer Farbe bedeutet also den relativen Farbengehalt, den relativen Weißgehalt mehr dem relativen Gehalt an farblosem Lichte und den relativen Schwarzgehalt. Eine Farbenempfindung, deren Farbenton eindeutig bestimmt ist, bedarf noch dieser drei weiteren Bestimmungen.

Eine Farbe kann einen geringen Sättigungsgrad haben, weil sie einen großen Weißgehalt hat, weißlich erscheint oder mit Weiß stark verdünnt ist. Die Farbe desselben Farbentones kann aber auch einen sehr geringen Weißgehalt haben und trotzdem sehr wenig gesättigt sein, weil sie relativ einen sehr großen Schwarzgehalt hat, eigentlich nur als Schwarzton erscheint, mit Schwarz verdünnt ist. Die Farbe desselben Farbentones kann mit allen beliebigen Graden von Grau verdünnt sein.

Eine Farbe kann nicht hell heißen, weil ihr Schwarzgehalt relativ groß ist, oder aber weil ihr Farbengehalt relativ groß ist, oder aber weil beide groß sind. Den hellen Farben stehen daher einerseits die dunklen, andrerseits die gesättigten gegenüber, und außerdem alle Übergänge der Vereinigung der Sättigung mit Dunkelheit bis zum Gleichgewichte der beiden.

Das Dunkle heißt so, weil der Schwarzgehalt relativ groß ist; dabei kann die Farbe ausgeschlossen sein (ungetöntes Grau), aber auch der Weißgehalt (gesättigte Schwarztöne).

Die eigentlichen Farbennamen, zu welchen weiß, grau und schwarz nicht gehören, beziehen sich gewöhnlich auf größere (jedoch nicht allzu große) Helligkeitsgrade oder mindestens auf größere Sättigungsgrade. Der Name braun macht eine Ausnahme, weil er sich auf einen bedeutenderen Schwarzgehalt (des Roth) bezieht, wobei aber nicht ausgeschlossen ist, dass auf Kosten der Sättigung (nicht aber des relativen Schwarzgehaltes) ein bedeutenderer Helligkeitsgrad (lichtbraun) mit diesem Ausdrucke bezeichnet wird.

Durch ziffernmäßige Angabe der hypothetischen Erregung der vier Sehblättchen ist eine Farben- oder aber eine

Lichtempfindung nach Farbenton, Sättigungsgrad, Helligkeitsgrad und Dunkelheitsgrad eindeutig bestimmbar. Es ist auch durch die Angabe bestimmbar, ob es sich um eine Empfindung glanzloser Farbe, glänzender Farbe oder farbigen Lichtes handelt. Die Größe der directen Erregung durch Licht ohne Einmischung der Sehstoffe, welche an dem anonymen Blättchen unvermehrt erscheint und an den drei anderen Blättchen als Ausgangswert enthalten ist, zu welchem der Zuwachs durch Einwirkung der Sehstoffe hinzutritt, deutet den Gehalt an farblosem Lichte, den Glanzgehalt an.

Die Mischung von Farbe mit Glanz bedeutet innerhalb der Empfindung einen einfachen Empfindungsinhalt, der einer zwar nicht einfachen aber einheitlichen Erregungsform zugeordnet ist, welche zwischen der Erregungsform für glanzlose Farbe und farblosen Glanz dazwischen liegt, jedoch nicht aus zwei verschiedenen Erregungsformen besteht. Bezüglich der außer dem Auge liegenden Ursachen sind jedoch offenbar zwei Ursachen anzunehmen: eine für den Glanz und eine für die Farbe. Denke ich mir z. B. eine Metalloberfläche, welche rauh ist, aus Bergen und Thälern besteht, und infolge dessen das Licht so unvollkommen reflectiert, dass das Metall grau bis schwarz erscheint, so können durch Polieren die Gipfel der Berge zu Hochebenen abgeschliffen werden; diese werden nun das farblose Licht farblos reflectieren, während die Gruben und Löcher als graue, beziehungsweise schwarze Punkte unsichtbar fein dazwischen gemengt bleiben. Die Wirkung auf das Auge wird entsprechend der Mischung von mattem Grau mit farblosem Glanz die einheitliche Erregungsform des Silberglanzes sein. In anderen Fällen werden die ungleichen Ursachen nicht nebeneinander, sondern hintereinander orientiert sein. So z. B. wird die erste Schichte farbloses Licht farblos reflectieren, von der zweiten Schichte wird das durch die erste Schichte durchgelassene und durch Absorption veränderte, also farbig wirkende Licht zum Theile reflectiert, zum Theile wiederum durchgelassen, so dass mehrere Schichten zusammenwirken, von denen die erste farblosen Glanz erzeugt, die letzte glanzlose Farbe und die mitt-

leren etwas Mittleres. Allerdings, wenn ich eine dicke fast farblose Glasplatte auf glanzlos farbiges Papier lege, dann habe ich die beiden Ursachen auch räumlich weit voneinander getrennt, und erst in größerer Entfernung des Objectes vom Auge wird der Wettstreit der Accomodationen unmöglich gemacht werden.

Durch die Elementarstructur der Sehblättchen ist der Vergrößerung der Amplituden eine Grenze gesetzt. Über diese Grenze hinaus muss entweder die Elementarstructur zerreißen oder eine photochemische Zersetzung erfolgen, soferne nicht noch die kaustische Wirkung des zum Brennpunkte gemachten Bildpunktes hinzutritt. Wird dieses Maximum erreicht, so kann eine Erhöhung der Intensität der äußeren Lichtquelle eine weitere Vergrößerung der Amplituden nicht mehr bewirken. Nun kann aber dieses Maximum für ein Sehblättchen erreicht sein, für das andere noch nicht. Dies wird bei jedem farbigen Lichte möglich sein. Im rothen Lichte wird z. B. das Purpurblättchen bereits im Maximum der Erregbarkeit sein, während das Gelbblättchen nahe daran ist, und das Blaublättchen noch weit zurück. Wird nun die Intensität des Lichtes verstärkt, so wird auch das Gelbblättchen in das Maximum einrücken, während die Erregung des Purpurblättchens constant geblieben ist; die Erregungshöhe des Purpurblättchens ist von derjenigen des anderen eingeholt worden, und auch diejenige des Blaublättchens ist verstärkt worden. Es wird also, ohne dass sich die Wellenlänge des Lichtes verändert, die Farbenempfindung gleichzeitig an die Grenze von Roth und Orange rücken und gleichzeitig an Sättigung verlieren; schliesslich muss sie in farbloses Licht übergehen; vorausgesetzt, dass die Elementarstructur der Sehblättchen eine solche Reizung ohne bleibende Schädigung erträgt.

Nun gibt es noch einen zweiten Factor, welcher bei allzu hoher sowie bei allzu niedriger Intensität der Lichtquelle das Auslöschen der Farbe verursacht und nur das farblose Licht übrig lässt. Dieser zweite Factor ist der Sehstoff selbst; dieser Factor ist so bedeutend, dass man mit ihm

allein ohne Rücksicht auf die Structur des Sehkörperchens die beiden genannten Erscheinungen erklären kann. Das Sehstoffmolecül wirkt nach dieser Hypothese nicht durch seine Zersetzung, sondern durch die der Zersetzung vorausgehende Schwingung auf den Sehfaden. Ist nun das Licht sehr intensiv, so wird der Zersetzung eine nur ganz kurze Schwingung vorausgehen; das intensive Licht wird trotz bedeutender Neubildung und Zersetzung von Sehstoffen keine lebhaftere Farbenempfindung bedingen können, als das ganz schwache; hingegen wird die directe Erregung des Sehfadens, an welche die Empfindung des glanzlosen Lichtes gebunden ist, hoch gesteigert sein. Die Färbung des Lichtes wird daher von einer gewissen Intensität des Lichtes an sinken und schließlich ganz verschwinden, weil das Licht die Sehstoffmolecüle ohne vorgehende photochemische Induction sofort zersetzt und dadurch die Möglichkeit benimmt, dass die Sehstoffmolecüle während der Inductionszeit auf die Sehfäden wirken. In ähnlicher Weise erklären die Sehstoffmolecüle die Entfärbung schwachen Lichtes. Im Jahre 1891 machte Hering [1]) die von seinem Standpunkte aus vorhergesehene Entdeckung, dass bei sehr geringer objectiver Helligkeit und nach vorausgegangenem längeren Aufenthalte im Dunkeln der Normalsichtige das prismatische Spectrum genau so sehe wie der total Farbenblinde unter gewöhnlichen Verhältnissen. Das Spectrum wird ein farbloses Band, dessen größte Helligkeit nicht wie bei dem normal gesehenen Spectrum in die Nähe von D, sondern in die Nähe von E fällt. Die langwellige Seite erscheint im Vergleiche mit der kurzwelligen dunkler und die letztere im Vergleiche mit der ersteren heller als es der Helligkeitsvertheilung bei höheren Lichtintensitäten entspricht. Ganz abgesehen von der Frage, ob alle total Farbenblinden das Spectrum genau so sehen, [2]) halte ich mich

---

[1]) Hering, Untersuchung eines total Farbenblinden. Pflügers Archiv Bd. 49, Seite 563.

[2]) A. König, „Über den Helligkeitswert der Spectralfarben bei verschiedener absoluter Intensität.“ In: Beiträge zur Psychologie und Physiologie der Sinnesorgane. Festschrift zu H. von Helmholtz 70. Geburtstage. Seite 309 ff. (1891).

hier an den Gegensatz innerhalb der Normalsichtigkeit. Durch den längeren Aufenthalt im Dunkeln verliert das Auge den Vorrath von unaufgebrauchten Sehstoffen durch die gewöhnliche Diffusion. Mit dem Bildungsmateriale für Sehstoffe kann nicht gesehen werden, im Dunkeln wird kein Sehstoff nacherzeugt und in der darauf folgenden äußerst schwachen Beleuchtung sieht das Auge nur mit den Sehfäden allein, ohne Hilfe von Sehstoffen. Es sieht daher nur aus der Mannigfaltigkeit zwischen Schwarz und farblosem Lichte mittlere Grade von leuchtendem Grau.

Die Sehstoffe haben im Sinne der hier festgehaltenen Hypothese mehrfache Wichtigkeit. Zunächst ermöglichen sie, weil sie die directe Einwirkung des Lichtes auf den Sehfaden um eine indirecte vermehren, das Sehen bei geringeren äußeren Lichtintensitäten, wie etwa in der Dämmerung. Das Huhn, welches wahrscheinlich keine Sehstoffe besitzt, worauf der Mangel an Sehpurpur hindeutet, sieht in der Dämmerung sehr schlecht, die Eule besitzt Sehpurpur. Ferner ermöglichen die Sehstoffe das Farbensehen, indem sie eine ungleichmäßige Erregung der Sehblättchen herbeiführen. Endlich ermöglichen sie den Empfindungsgegensatz glanzloses Weiß und farbloses Licht. In der Hypothese wurde der Erregungsgegensatz so construiert, dass in dem einen Falle drei, in dem anderen vier Sehblättchen gleich stark erregt werden. Dieser Gegensatz ist nicht weniger deutlich vorhanden, als derjenige zwischen glanzlosem Schwarz und glanzlosem Weiß oder zwischen glanzlosem Schwarz und farblosem Licht. Ordnet man diese drei Extreme an die Ecken eines Dreieckes, so liegt zwischen glanzlosem Schwarz und glanzlosem Weiß (Kreideweiß) glanzloses Grau; zwischen glanzlosem Schwarz und farblosem Lichte glänzendes Schwarz und Silberglanz; zwischen glanzlosem Weiß (Kreideweiß) und farblosem Lichte glänzendes Weiß (Schneeweiß). Jeder Punkt in der Dreiecksfläche entspricht einem Punkte in dieser Farben- und Lichtempfindungsmannigfaltigkeit.

Im Ganzen macht diese Hypothese zehn Annahmen: vier Sehblättchen, drei Sehstoffe und drei Gleichstimmungen

zwischen Sehblättchen und Sehstoff. Sie hat um eine Annahme mehr als die Hering'sche, welche sechs Sehprocesse und drei antagonistische Verhältnisse zwischen denselben annimmt. Verzichtet man darauf, dem Empfindungsgegensatze glanzloses Weiss und farbloses Licht einen ebenso scharfen Erregungsgegensatz gegenüberzustellen, so könnte man nach Weglassung des anonymen Sehblättchens gleichfalls mit neun Annahmen das Auslangen finden. Ich würde dies aber für einen Mangel der Hypothese halten.

Die Annahme von Sehstoffen wird durch das Vorkommen von Sehpurpur nahegelegt.

Der bekanntlich von Boll (1876) entdeckte Sehpurpur [1]) ist ein Stoff, welcher die Außenglieder der Stäbchen im lebenden Auge purpurroth färbt. Kühne fand (1877), dass der Sehpurpur auch im todten Auge erhalten bleiben und daher im Natriumlichte der Gelbkammer untersucht werden kann. Durch Tageslicht wird der Sehpurpur sogleich zersetzt. Schon Boll hatte daher die Ansicht ausgesprochen, dass der Sehpurpur dem Sehen als eigentlicher Sehstoff diene, und daher durch das Sehen immer wieder zersetzt werde, daher entsprechende Neubildung voraussetze. Kühne hat gezeigt, dass der Sehpurpur in der Chorioidea entstehe. Das Vorkommen von Sehpurpur im menschlichen Auge zeigten die Beobachtungen von Hans Adler (1877), Schenk und Zuckerkandl (1878). Was aber gegen die Deutung des Sehpurpurs als eines Sehstoffes zu sprechen schien, war der Umstand, dass der Sehpurpur gerade dort fehlt, wo am deutlichsten gesehen wird, nämlich in den Zapfen und im gelben Flecke. Ich glaube, dass man schon damals nicht hätte erwarten sollen, an den Orten des stärksten Verbrauches die größten Vorräthe aufgespeichert zu finden, und an den Stätten des geringsten Verbrauches die geringsten Vorräthe, wenn dieselben schutzlos dem zerstörenden Einflusse des Lichtes

---

[1]) Abhandlungen und Mittheilungen Kühnes in Untersuchungen aus dem physiologischen Institute zu Heidelberg. 4 Bände. In Hermanns Handb. d. Physiol. Bd. III., Th. I., Seite 235 ff. eine zusammenfassende Darstellung.

preisgegeben sind und die Aufspeicherung eben nur die Folge der Lichtschwächung ist. Gerade der Umstand, dass der Sehpurpur nicht an der Stelle des deutlichsten Sehens und nicht in den Zapfen gefunden wird, spricht für den Zusammenhang des Sehpurpurs mit den Sehstoffen.

Der hier in der Hypothese angenommene Sehstoff namens „Purpurstoff" soll nicht mit dem „Sehpurpur" verwechselt werden. Der Sehpurpur heißt so, weil er purpurfarbig ist; der „Purpurstoff" hingegen heißt so, weil nach der Hypothese infolge der Schwingung seiner Molecüle ein bestimmtes Blättchen des Sehfadens erregt wird, und in dem Falle, als dieses Blättchen stärker als die übrigen erregt wird, die Purpurempfindung auftritt. Der „Purpurstoff" muss nicht selbst purpurfarbig sein, obwohl er es sein kann. Der Sehpurpur kann als Gemenge von Sehstoffen aufgefasst werden; vielleicht ist er nur ein Gemenge von Bildungsmaterialien für die Sehstoffe. Die Sehstoffe selbst müssen nicht unbedingt auffindbar sein, weil sie möglicher Weise erst in den Verbrauchsstellen durch das Licht selbst und nur für die Zeit des Verbrauches aus dem Bildungsmateriale erzeugt werden. Ein Überschuss an Sehstoffen nach Aufhebung der Beleuchtung wird nur in sehr kleinen Mengen zu erwarten sein. Das Bildungsmaterial selbst muss nicht überall in gleicher und nicht überall in sichtbarer Concentration vorhanden sein.

Gegen den Sehpurpur als Sehstoff schien auch das Fehlen des Sehpurpurs bei vielen Vertebraten zu sprechen. Nach Boll, Kühne und Anderen fehlen in den Netzhäuten der meisten Reptilien Stäbchen und Sehpurpur. Taube und Huhn haben keinen Sehpurpur. Emys Europaea [1]) hat keinen Sehpurpur. Ich glaube, dieses Bedenken ist nicht schwerwiegend. Ein Gemenge von Bildungsmaterialien für Sehstoffe, sowie ein Gemenge von Sehstoffen selbst kann sich bei ungleicher Lichtabsorption und gleichen Löslichkeitsverhältnissen bis zur Farblosigkeit mischen. Noch einfacher ist es, die Thiere

---

[1]) Else Köttgen und Georg Abelsdorf, Absorption und Zersetzung des Sehpurpurs bei den Wirbelthieren. Zeitschrift für Psychologie, XII. Bd., Seite 163.

ohne Sehpurpur und ohne analoge Stoffe für total farbenblind zu halten, wobei diese Thiere noch immer schärfer sehen können als andere, soferne sie nur empfindliche Sehblättchen oder scharfe Bildentwicklung haben. Die Sehstoffe sind ja nur Farbensehstoffe und nicht Sehstoffe schlechthin, deren Abwesenheit eine gänzliche Blindheit zur Folge haben müsste.

Ebbinghaus hat daher Recht gehabt, trotz der vorgebrachten Bedenken auf dem Standpunkte von Boll zu beharren, und den Sehpurpur in eine bestimmte Beziehung zu den Sehstoffen zu setzen. In seiner „Theorie des Farbensehens“ [1]) identificiert er den Sehpurpur geradezu mit einem der drei photochemisch zersetzbaren Sehstoffe, welche er annimmt. Nach Ebbinghaus sind drei Sehstoffe zu unterscheiden: eine Weißsubstanz, welche über die ganze Netzhaut verbreitet und zugleich am lichtempfindlichsten ist (dient den Empfindungen Weiß und Grau), der Sehpurpur in den Außengliedern (dient der gelben und blauen Lichtfärbung) und die Rothgrünsubstanz (dient der rothen und grünen Lichtfärbung). Die Rothgrünsubstanz finde sich beim Menschen nur in den Außengliedern der Zapfen, zusammen mit dem complementärfarbigen Sehpurpur, daher das Gemenge farblos ist.

Dem Sehpurpur wendet sich in neuerer Zeit wieder das gebührende Interesse zu. [2]) Aus der Arbeit von E. Köttgen und G. Abelsdorf sei hervorgehoben, dass die Untersuchungen von 4 Säuger-, 1 Vogel-, 3 Amphibien- und 8 Fisch-Species zwei Arten von Sehpurpur ergaben, von denen eine bei den Säugern, Vogel und Amphibien (Maximum der Absorption bei Wellenlänge 500 $\mu\mu$), die andere bei

---

[1]) H. Ebbinghaus, Theorie des Farbensehens. Zeitschrift für Psychologie, V. Bd. Seite 145—238.

[2]) H. J. Hamburger „Staafjesrood in monochromatisch licht“, Festbundel aan F. C. Donders, Amsterdam 1888, S. 501—510.

A. König „Über den menschlichen Sehpurpur und seine Bedeutung für das Sehen.“ Sitzungsber. d. Ak. d. W. zu Berlin, 21. Juni 1894, S. 577.

W. Kühne „Zur Darstellung des Sehpurpurs.“ Zeitschr. f. Biologie N. F. Bd. XIV, S. 21., 1895.

Else Köttgen und Georg Abelsdorf „Absorption und Zersetzung des Sehpurpurs bei den Wirbelthieren.“ Zeitschrift f. Psychologie, XII., 1896.

den Fischen vorkam (Absorptionsmaximum bei 540 μμ). Beide Maximen liegen in Grün, dasjenige der Fische in Annäherung an Gelbgrün. Der Sehpurpur der Fische sieht mehr violett aus. Die photochemische Zersetzung des Sehpurpurs wurde untersucht bei: Abramis brama, Rana temporaria, Kaninchen und Kalitrichus sabaeus. Der Sehpurpur entfärbte sich in weißem, gelbem und blauem Lichte ohne vorherige Bildung von Sehgelb.

Die hier entwickelte Hypothese geht von der Voraussetzung aus, dass alle wie immer benannten Farben und auch Weiß für die Empfindung ganz gleich einfach sind, dass es also für die Empfindung als solche keine Mischfarben gibt. Weiß ist ebenso einfach wie Roth oder Grün, Gelb oder Blau. Orange ist nicht weniger einfach als Roth, Blaugrün nicht weniger einfach als Grün und Violett nicht weniger einfach als Blau, Weiß oder Schwarz. In der Empfindung wird das Orange nicht als Gemenge von Roth und Gelb empfunden, vergleichbar dem Bittersüßen und dem Säuerlichsüßen, sondern als eine einfache Fmpfindung, von der man nur sagen kann, sie liege in der Farbenmannigfaltigkeit zwischen Roth und Gelb, und könne bald mehr einem bestimmten Roth bald mehr einem bestimmten Gelb naheliegen. In gleicher Weise liegt auch das Roth zwischen Rothpurpur und Orange, das Gelb zwischen Orangegelb und Grünlichgelb. Sieht man von der Sprache ab, so liegt kein Grund vor, irgend einer dieser Empfindungen Einfachheit und einer anderen Gemischtheit zuzuschreiben. Diese Empfindungen sind alle ganz gleich einfach. Die Möglichkeit, jede Empfindung durch ihren Ort in der Empfindungsmannigfaltigkeit zu orientieren, ist noch kein Grund, sie eine Mischempfindung zu nennen, und die der Orientierung zu Grunde liegenden willkürlich fixierten Punkte wie Weiß, Schwarz, Roth oder Grün als einfache Empfindungen zu bezeichnen. Auf die Sprache darf man sich hier nicht allzusehr verlassen. Die Sprache läßt sich bei der Namengebung nicht so sehr von empfindungsanalytischen Motiven als vielmehr von der Menge und der Wichtigkeit der farbigen Gegenstände leiten. Wäre das

Chlorophyll orangefarben, der unbewölkte Himmel violett, und das Blut der Vertebraten blaugrün, so hätten wir voraussichtlich ganz andere Hauptfarbennamen als jetzt.

Der einfachen Farben- und Lichtempfindung werden nicht einfache physiologische Daten entsprechen. Der akustischen Schwingung, einer charakteristischen Bewegungsform, entspricht nicht eine Tonveränderung, sondern ein ruhender Ton; der optischen Schwingung nicht eine Farbenveränderung oder Lichtveränderung, sondern eine ruhende Farben- oder Lichtempfindung. Erst der Schwingungsveränderung entspricht eine Empfindungsveränderung. Die physiologische Zuordnung hat nicht die Einfachheit des Empfindungsdatums: aber immerhin wird man von ihr eine wohlcharakterisierte Form, also eine Art Einheitlichkeit erwarten dürfen, und zwar Einheitlichkeit der Bewegungsform an der Einheitlichkeit einer morphologischen Grundlage, welche eben in Bewegung versetzt wird.

Ich schließe also, weil alle Farbenempfindung sowie die Empfindungen von Weiß, Grau und Schwarz, sowie endlich die Empfindung des farblosen Lichtes ganz gleich einfach sind, dass auch die ihnen entsprechenden Erregungsformen des eigentlichen und letzten Sehorganes ganz gleich einheitlich, daher auch ganz gleich viel und gleich wenig compliciert sind.

Weil aber die Erregungsformen immer aus den Erregungen aller vier Sehblättchen zusammengesetzt sind, oder, um ohne Hypothese zu sprechen, weil die physiologische Zuordnung nicht einfach sondern nur einheitlich ist, und sowohl in der morphologischen Einheitlichkeit des Erregten als in der physikalischen Einheitlichkeit der Erregungsform etwas Zusammengesetztes genannt werden kann, so sind in diesem Sinne, von der Seite der physiologischen Zuordnung betrachtet, alle Farbenempfindungen Mischempfindungen, und alle sind es in ganz gleichem Grade, Roth so gut wie Purpur und nicht weniger als Weiss, Grau, Schwarz oder farbloses Licht.

Jede Farbenempfindung kann continuierlich in eine gewünschte andere überführt werden, wobei bald der Übergang, nach der Namengebung beurtheilt, ohne Zwischenfarbe erfolgt

und bald nur durch eine Zwischenfarbe möglich ist. So kann Grün in Blau, Gelb in Grün verändert werden, ohne dass die dazwischen durchlaufene Farbentonmannigfaltigkeit weit genug ausgespannt wäre, um eine eigene einfache Zwischenbenennung zu führen. Hingegen liegt zwischen Roth und Grün, ebenso zwischen Gelb und Blau ein größeres Stück Farbenmannigfaltigkeit. Man hat von Roth nach Grün den Weg über Orange, Gelb und Gelbgrün; man hat auch den Weg über Fleischrosa, Weiß und Grünlichweiß. Die größere oder geringere Entfernung von Empfindungselementen in der Empfindungsmannigfaltigkeit gibt keinen genügenden Anhalt, um die Empfindungen in einfache und gemischte einzutheilen. Roth ist relativ zu Gelb nahe, relativ zu Grün weit.

Den Orientirungsverhältnissen innerhalb der Farbenempfindungsmannigfaltigkeit sollen nun analoge Orientierungsverhältnisse der Mannigfaltigkeit der Erregungsformen entsprechen. Dies lässt sich hypothetisch durchführen, wenn man die Gesammterregung aller vier Sehblättchen als eine einheitliche Erregungsform festhält. Aus den graphischen Darstellungen erhellt unmittelbar, dass jede Erregungsform continuierlich und ohne Zwischengebiet in Schwarz, in Weiß, in farbloses Licht übergehen kann; ferner, dass gewisse Formen wie Roth und Gelb, Grün und Blau, Purpur und Violett einander sehr nahe stehen, und wiederum andere wie Roth und Grün, Gelb und Blau, nur durch Zwischenformen und zwar durch mehr als eine, zwischen welchen gewählt werden kann, ineinander überführt werden können.

Die eigentlichen Grundfarben, als welche hier Purpur, Gelb, Cyanblau und eine anonyme nicht zur Betonung zu bringende latente vierte Farbe angenommen werden, sind nur hypothetische und dabei nur hypothetisch-potentielle Empfindungen, welche nie in die Wirklichkeit der Empfindung treten, und deren physiologische Zuordnung auch nicht einfach, aber doch weniger compliciert ist als diejenige der wirklich empfundenen Farben. Diese Grundfarben sind den empirischen Farben Purpur, Gelb und Blau nur in Bezug auf den Farbenton gleichgestellt, im übrigen aber unempfind-

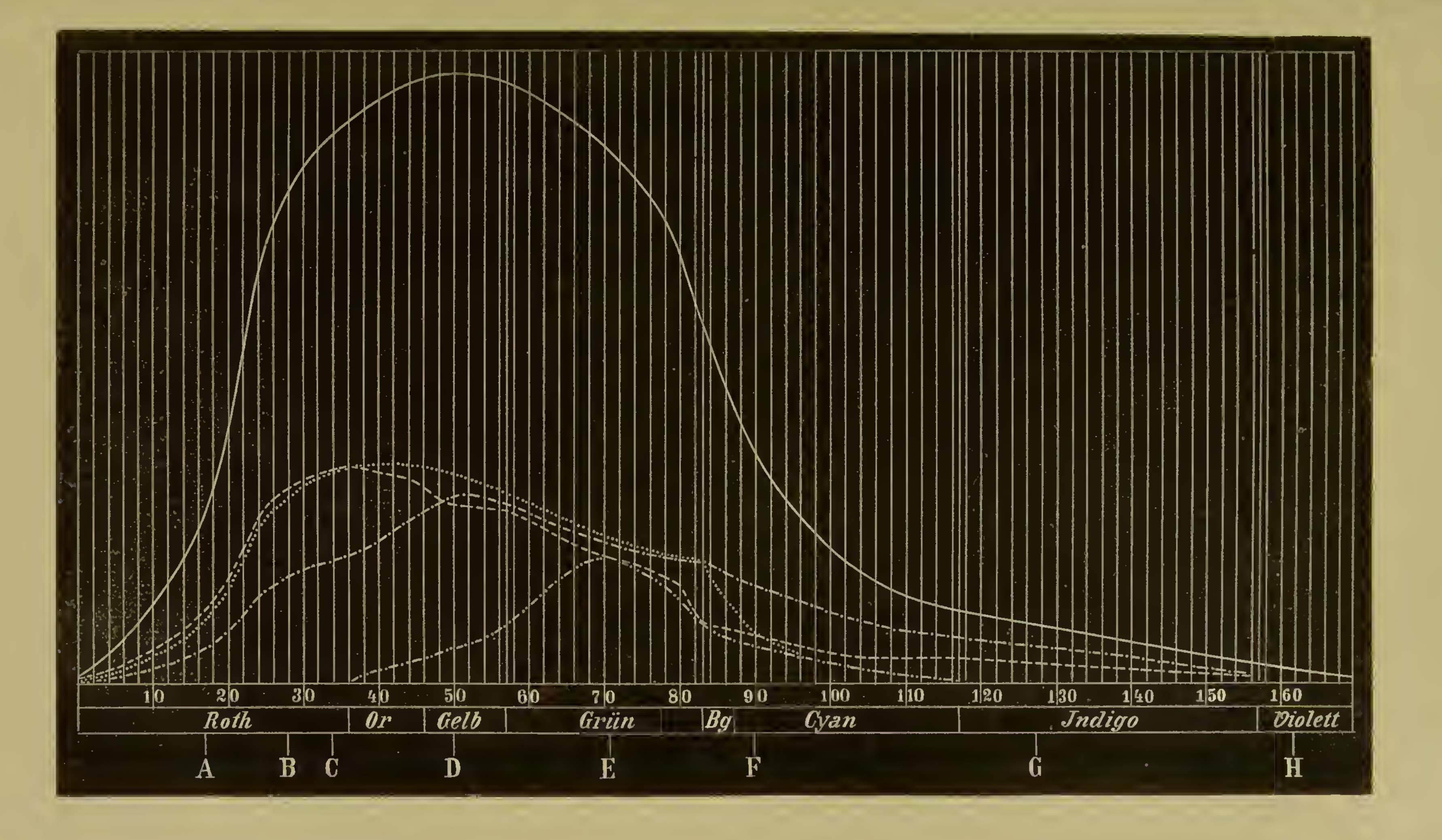
bar; sie entsprechen den einzelnen Gliedern der morphologischen Einheit. Weil aber diese Glieder nie isoliert erregt werden, so kommen auch die Grundfarben niemals in die Empfindung. Die Grundfarben sind eigentlich nur Namen, mit denen man auf Umwegen die Theile der morphologischen Einheit und die Erregungsformtheile dieser Einheit zu bezeichnen bestrebt ist.

II.

Anwendung der Hypothese auf das normal gesehene Spectrum.

Ich wähle zur Darstellung ein concretes Beispiel. Es handle sich um ein Dispersions-Spectrum des Sonnenlichtes, das in einer bestimmten Intensität und in Bezug auf ein bebestimmtes normal trichromatisches Empfindungs-System erzeugt wird. Ich entwerfe mir ein Ordinatensystem, in dessen Abscisse jede Wellenlänge als Punkt eingetragen werden kann. (Vgl. d. Tafel). Ich begnüge mich, auf diese Abscisse in Abständen von je 2 *mm* der Zeichnung eine Ordinate zu ziehen, und diese Ordinaten mit 0°, 2°, 4° u. s. f. bis 170° zu bezeichnen; nur ausnahmsweise sind in Abständen von 1 *mm* Ordinaten gezogen, und zwar in 57°, 83°, 117° und 157°. Es handle sich nun darum, den Erregungszustand der Sehblättchen einzuzeichnen. In der völligen Verfinsterung wird für alle Sehblättchen die Amplitudengröße der Schwarzschwingung und sonst nichts einzutragen sein. Diese Amplitudengröße sei für jedes Sehblättchen, bei dem sehr großen Maßtabe der Zeichnung beispielshalber mit 0·1 *mm* einzutragen. Nun trete eine Beleuchtung mit gegebener constanter Intensität ein. Der Zustand der Schwarzschwingung wird für alle Sehbättchen aufgehoben werden. Das Licht wird alle Sehblättchen direct in Erregung versetzen; es würde dadurch, wenn es keine Miteinwirkung der Sehstoffe gäbe, die Empfindung des farblosen Lichtes bedingen. Die Erregungscurven,

welche hier zugleich die Wirksamkeitscurven sind, würden für alle vier Sehblättchen congruent sein. Nun wird aber die Erregung dreier Sehblättchen durch die im Lichte erzeugten und schwingenden Sehstoffmolecüle verstärkt; dadurch werden die Curven nicht nur erhöht, sondern auch aus der Congruenz gebracht, weil die Wirkungen der Sehstoffe auf die ihnen entsprechenden Sehblättchen ungleich sind. Das anonyme Blättchen allein, welchem kein Sehstoff entspricht, wird in der niedrigeren Curve der nur directen Einwirkung des Lichtes verbleiben. Diese Curve ist in der Tafel (Seite 50) durch —..—..— bezeichnet. Als Maß der Erregung wähle ich hier die Amplitudengröße eines bestimmten im anonymen Sehblättchen in einer bestimmten Richtung schwingenden Theilchens; diese Amplitude vergleiche ich dann mit der (hypothetischen) Amplitude der homologen Theilchen in den anderen Sehblättchen. Die Amplitudengröße stelbst soll in außerordentlich starker Vergrößerung als Ordinatenwert eingetragen sein. Die zum Beispiele gewählten und in der Tafel eingetragenen Ordinatenwerte sollen durchaus nur Exemplificationen für unermittelbare Größen sein, über deren Relationen eine Discussion möglich ist. Die Ordinatenwerte des Purpur-Gelb- und Blaublättchens werden, weil die Verstärkung der Erregung durch die Sehstoffe hinzukommt, meistens größer sein als der Ordinatenwert des anonymen Blättchens; ist die Verstärkung durch die Sehstoffe ausnahmsweise verschwindend klein, so werden diese Werte gleich sein; niemals werden die erst genannten Ordinatenwerte kleiner sein als diejenigen für das anonyme Sehblättchen. Denkt man sich die Sehstoffe und deren Wirksamkeit weg, so werden alle vier Curven nach den Voraussetzungen der Hypothese congruent werden und mit der unverändert gebliebenen Curve des anonymen Sehblättchens zusammenfallen. Das Spectrum erscheint dann farblos leuchtend, mit der größten Helligkeit in der Nähe von *E*. Das Spectrum erscheint an beiden Enden abgeschwächt. Die vier congruenten Curven kann man auch durch eine andere Darstellung ersetzen, indem man in jedem Abscissenpunkte den vierfachen Wert der Ordinate für das


10
20
30
40
50
60
70
80
90
100
110
120
130
140
150
160
Roth
Or
Gelb
Grün
Bg
Cyan
Jndigo
Violett
A
B
C
D
E
F
G
H

anonyme Sehblättchen, also die Summe der vier Ordinatenwerte für die vier Sehblättchen aufträgt. Man erhält dadurch eine Curve des farblosen Lichtes, welche sich ungefähr mit der von A. König und C. Dieterici[1]) mitgetheilten Empfindungscurve des Monochromaten Dr. A. Beyssell deckt, und jedenfalls derselben mit jedem wünschenswerten Grade der Genauigkeit nähergebracht werden kann, weil es sich ja in dem hier gegebenen Falle nur um exemplificierende Werte handelt, deren Relationen beizubehalten sind, während die Curve des anonymen Sehblättchens in den absoluten Werten innerhalb gewisser Grenzen willkürlich ist.

Nach den Voraussetzungen der Hypothese kommt die Färbigkeit in das Spectrum durch die Mitwirkung der Sehstoffe. Diese verstärken die Erregungen der Sehblättchen *p*, *g* und *b*; die Erregungscurven und mithin auch die Empfindungscurven werden mit Ausnahme weniger Stellen erhöht, nirgends erniedrigt, und überdies in einem und demselben Abscissenpunkte ungleich erhöht. Wäre die Einwirkung der Sehstoffe auf die Sehblättchen gleichmäßig, so fände nur ein Uebergang des farblosen Lichtbandes in leuchtendes Weiß statt. Die drei auch durch Sehstoffe erregten Sehblättchen hätten dann drei congruente Curven, von denen jede die Curve des anonymen Blättchens überragt.

Infolge der ungleich verstärkten Erregung der Sehblättchen gehen nun die vier Curven auseinander. Es ist nun ein Purpur- eine Gelb- und eine Blaucurve außer der Curve des anonymen Sehblättchens zu unterscheiden. In der beigegebenen Tafel (Seite 50) ist die Purpurcurve (Erregungscurve des Purpursehblättchens) durch — — — — gezeichnet; die Gelbcurve durch . . . . . . und die Blaucurve durch .—.—.—.—. Am kurzwelligen Ende des Spectrums ist die Purpurcurve von der Blaucurve wegen der Kleinheit des Maßtabes nicht mehr auseinandergehalten, sondern in eine ausgezogene Linie vereinigt. Ebenso verläuft die Gelbcurve im kurzwelligen Ende

[1]) A. König und C. Dieterici „Die Grundempfindungen in normalen und anomalen Farbensystemen und ihre Intensitätsvertheilung im Spectrum.“ Zeitschrift für Psychologie. Bd. IV, Seite 241 ff.

scheinbar schon in Blau in die Abscisse. Um die Unzulänglichkeit der Zeichnung zu corrigieren, habe ich die exemplificierenden Werte ziffernmäßig in die nachfolgende Tabelle zusammengestellt. In jedem Abscissenpunkte kann die Summe der vier Ordinatenwerte aufgetragen werden. Die Endpunkte dieser summierten Werte liegen dann in einer Gesammtempfindungscurve des normal farbigen Spectrums. Diese Curve ist in der Zeichnung durch eine ausgezogene Linie gegeben. Die Curve des normal farbigen Spectrums wird nach den Voraussetzungen der Hypothese immer die Curve des farblos leuchtenden Spectrums umgreifen; vorausgesetzt dass die Erregbarkeit der Sehblättchen die gleiche ist. Selbstverständlich kann es vorkommen, dass die Sehstoffe fehlen, während die Erregbarkeit der Sehblättchen abnorm hoch ist. Es wird hierin für manche Lebewesen geradezu ein regelmäßiger Ersatz für die mangelnde Verstärkung der Erregung durch Sehstoffe gelegen sein.

Die Verstärkung der Erregung der Sehblättchen durch Sehstoffe wird nicht nur Farbe in das Spectrum bringen, sondern auch die größte Helligkeit aus der Nähe von *E* in die Nähe von *D* schieben können, wie in der graphischen Darstellung exemplificiert ist.

Ich lasse nun zur genaueren Darstellung des Beispieles die der Tafel (Seite 50) entsprechende ziffernmäßige Wert-Tabelle folgen:

	Purpur-Ordinate	Gelb-Ordinate	Blau-Ordinate	Anonyme Ordinate	Summe der vier Ordinaten
0°	0·4167	0·3167	0·2167	0·1500	1·1001
2°	0·8294	0·5900	0·3223	0·1584	1·9001
4°	1·5131	1·1113	0·6091	0·1667	3·4002
6°	2·3488	1·7764	0·9750	0·1751	5·2753
8°	3·2738	2·5445	1·3984	0·1833	7·4000
10°	4·2853	3·4171	1·8810	0·1917	9·7751
12°	5·3253	4·3501	2·3997	0·2000	12·2751
14°	6·8282	5·7065	3·1571	0·2084	15·9002
16°	8·5627	7·3116	4·0589	0·2166	20·1498
18°	10·5746	9·2148	5·1356	0·2250	25·1500
20°	13·4314	11·9310	6·6793	0·2334	32·2751

	Purpur-Ordinate	Gelb-Ordinate	Blau-Ordinate	Anonyme Ordinate	Summe der vier Ordinaten
22°	17·9861	16·2687	9·1536	0·2417	43·6501
24°	21·9829	20·2260	11·4414	0·2501	53·9004
26°	24·4021	22·8157	12·9803	0·2583	60·4564
28°	25·9181	24·6031	14·0828	0·2667	64·8707
30°	26·8604	25·8638	14·9008	0·2750	67·9000
32°	27·5833	26·9184	15·6152	0·2834	70·4003
34°	28·0561	27·7268	16·2004	0·2916	72·2749
36°	28·5277	28·5277	16·7945	0·3000	74·1499
38°	28·1791	28·7902	17·5557	0·9750	75·5000
40°	27·7457	28·9680	18·7237	1·4625	76·8999
42°	27·2291	29·0625	19·9084	1·9500	78·1500
44°	26·5124	28·9570	21·2056	2·4750	79·1500
46°	25·6333	28·6891	22·5775	3·0000	79·8999
48°	24·4018	28·4223	23·8259	3·7500	80·4000
50°	23·8435	27·9098	24·4494	4·4472	80·6499
52°	23·7681	27·0094	24·8100	5·0625	80·6500
54°	23·5311	26·2323	24·7115	5·9250	80·3999
56°	23·2586	25·3273	24·2640	7·0500	79·8999
57°	22·8417	24·8417	23·8417	7·8750	79·4001
58°	22·3750	24·4484	23·4516	8·6250	78·9000
60°	21·4750	23·7380	22·7370	10·2000	78·1500
62°	20·2500	23·0066	21·8934	12·0000	77·1500
64°	19·2500	22·0947	21·0553	13·5000	75·9000
66°	18·2500	21·0293	20·1207	15·0000	74·4000
68°	17·3750	20·0188	19·2562	16·1250	72·7750
70°	16·6875	19·1304	18·5196	16·6875	71·0250
72°	16·2250	18·5946	18·0933	16·2000	69·1129
74°	15·7750	18·0466	17·6534	15·3000	66·7750
76°	15·2000	17·4247	17·1253	14·4000	64·1500
78°	14·3688	16·8799	16·6384	13·0500	60·9371
80°	12·6484	16·5766	16·3500	11·3250	56·9000
82°	9·2727	16·3706	16·2341	9·2727	51·1501
83°	8·0385	16·3806	16·3806	8·0385	48·8382
84°	7·6874	14·3764	15·9250	7·3500	45·3388
86°	7·2007	11·8474	14·7000	6·1500	39·8981
88°	6·5988	9·1342	13·9000	5·5500	35·1830
90°	6·1814	7·1641	13·1633	4·7601	31·2689
92°	5·5977	5·6603	12·0250	4·4250	27·7080
94°	4·9930	4·5250	11·3018	4·0500	24·8698
96°	4·3271	3·6759	10·5515	3·6759	22·2304
98°	3·9578	3·0705	10·0162	3·0705	20·1150
100°	3·6371	2·5988	9·3606	2·5988	18·1953
102°	3·4111	2·1042	8·8254	2·1042	16·4449
104°	3·2032	1·7475	8·1416	1·7475	14·8398
106°	3·0891	1·4003	7·6653	1·4003	13·5550
108°	3·0278	1·1118	7·2638	1·1118	12·5152
110°	2·9817	0·8598	6·8646	0·8598	11·5659
112°	2·9986	0·6516	6·5896	0·6516	10·8914
114°	3·0455	0·4686	6·3633	0·4686	10·3460
116°	3·0947	0·3023	6·1314	0·3023	9·8307
117°	3·1203	0·2250	6·0155	0·2250	9·5858

	Purpur-Ordinate	Gelb-Ordinate	Blau-Ordinate	Anonyme Ordinate	Summe der vier Ordinaten
118°	3·0706	0·2237	5·8935	0·2237	9·4115
120°	2·9711	0·2208	5·6492	0·2208	9·0619
122°	2·8717	0·2180	5·4051	0·2180	8·7128
124°	2·7723	0·2151	5·1608	0·2151	8·3633
126°	2·6729	0·2123	4·9167	0·2123	8·0142
128°	2·5734	0·2094	4·6724	0·2094	7·6646
130°	2·4740	0·2066	4·4283	0·2066	7·3155
132°	2·3745	0·2037	4·1840	0·2037	6·9659
134°	2·2751	0·2010	3·9399	0·2010	6·6170
136°	2·1757	0·1982	3·6957	0·1982	6·2678
138°	2·0762	0·1953	3·4515	0·1953	5·9183
140°	1·9768	0·1925	3·2073	0·1925	5·5691
142°	1·8773	0·1896	2·9631	0·1896	5·2196
144°	1·7780	0·1868	2·7189	0·1868	4·8705
146°	1·6785	0·1839	2·4747	0·1839	4·5210
148°	1·5791	0·1812	2·2305	0·1812	4·1720
150°	1·4797	0·1784	1·9864	0·1784	3·8229
152°	1·3802	0·1755	1·7421	0·1755	3·4733
154°	1·2808	0·1727	1·4980	0·1727	3·1242
156°	1·1813	0·1698	1·2537	0·1698	2·7746
157°	1·1317	0·1685	1·1317	0·1685	2·6004
158°	1·0715	0·1670	1·0638	0·1670	2·4693
160°	0·9512	0·1641	0·9281	0·1641	2·2075
162°	0·8310	0·1613	0·7926	0·1613	1·9462
164°	0·7108	0·1586	0·6570	0·1586	1·6850
166°	0·5905	0·1557	0·5213	0·1557	1·4232
168°	0·4703	0·1529	0·3857	0·1529	1·1618
170°	0·3500	0·1500	0·2500	0·1500	0·9000

In jedem Abscissenpunkte wird der vierfache Wert der Ordinate für das anonyme Sehblättchen den Gehalt an farblosem Lichte symbolisieren. Die drei durch Sehstoffe erregbaren Blättchen werden einen Überschuss über das farblose Licht liefern, welcher meistens von allen drei Sehblättchen, mindestens aber von zweien herstammt. Sind die Ordinaten für Purpur, Gelb und Blau, jede allein genommen, größer als die Ordinate für das anonyme Blättchen, so wird sich der Überschuss der kleinsten der drei erstgenannten Ordinaten über den Wert der Ordinate für das anonyme Blättchen mit gleich großen Stücken aus den Überschüssen der zwei anderen Ordinaten zu einem Werte summieren, welcher die Bedingung für Weiß darstellt. Dieses Weiß wird sich mit farblosem Lichte mischen und zusammen mit demselben den Helligkeits-

grad ausmachen. Die Überschüsse der zwei größeren Ordinaten über farbloses Licht und über Weiß werden einer absolut gesättigten Farbe entsprechen, welche eben durch farbloses Licht und durch Weiß verdünnt wird.

Die absoluten Ordinatenwerte der vier Curven und ihre Summe sind zum Zwecke der Veranschaulichung der Problemstellung derart exemplificiert worden, dass ein beständiger Übergang der Farbentöne von einem Ende des Spectrums zum anderen stattfindet. Im Sinne der früher gegebenen Farbendefinitionen reicht das Roth im Spectrum vom Anfange bis an den Schnittpunkt der Purpur- und Gelbcurve; das Orange von diesem bis zu jenem anderen Punkte, wo das Übergewicht von Gelb über Blau sich zum Übergewichte von Purpur über Blau wie 1 : 0·5 verhält. Das Gelb erscheint als Punkt des neutralen Gelb über dem Schnittpunkte der Purpur- und Blaucurve. Dieser Punkt theilt die Strecke in ein nach Orange und in ein nach Grün neigendes Gelb. Das Grün beginnt bei dem Punkte, wo das Übergewicht von Gelb über Purpur sich zum Übergewichte von Blau über Purpur wie 1 : 0·5 verhält und reicht bis zum Schnittpunkte der Gelb- und Blaucurve. Das Grün ist durchaus analog zu Roth construirt. Sowie das Roth durchaus auf dem Übergewichte von Purpur über Gelb bei großer Annäherung der Curven beruht, so beruht Grün durchaus auf dem Übergewichte von Gelb über Blau bei großer Annäherung der Curven. Sowie der Schnittpunkt der Curven am brechbareren Ende von Roth liegt, so liegt der Schnittpunkt der Curven in Grün auch am brechbareren Ende. Sowie Roth mit dem Verhältnisse 1 : 0·5 beginnt, so beginnt auch Grün mit dem Verhältnisse 1 : 0·5. Sowie Roth nicht unmittelbar an Gelb grenzt, sondern an Orange, so grenzt auch Grün nicht unmittelbar an Cyanblau, sondern an Blaugrün, dem Analogon zu Orange. Blaugrün ist analog zu Orange construirt; es beginnt mit dem Schnittpunkte der Gelb- und Blaucurve und reicht bis zu jenem Punkte, wo das Übergewicht von Blau über Purpur sich zum Übergewichte von Gelb über Purpur wie 1 : 0·5 verhält. Diese Strecke ist sehr kurz; sie reicht in der gra-

phischen Darstellung der Tafel von 83° bis 86·891589°. Der neutrale Cyanblaupunkt liegt analog dem neutralen Gelbpunkte über dem Schnittpunkte der Purpur- und Gelbcurve; er scheidet das Cyanblau in ein nach Blaugrün neigendes und in ein nach Indigo neigendes Cyanblau. Indigo beginnt mit dem Punkte, wo sich das Übergewicht von Blau über Gelb zum Übergewichte von Purpur über Gelb wie 1 : 0·5 verhält und reicht bis zum Schnittpunkte der Purpur- und Blaucurve. Violett beginnt mit dem Schnittpunkte der Purpur- und Blaucurve und endet im Ende des Spectrums mit dem Verhältnisse Purpur über Gelb zu Blau über Gelb wie 1 : 0·5. Violett ist insoferne mit Roth symmetrisch, als beiderseits die Schnittpunkte der Curven gegen die Mitte des Spectrums gekehrt und beide Enden die Farbentonverhältnisse 1 : 0·5 haben. Die Verwandtschaft von Violett mit Roth ist dadurch erklärt, dass in beiden Fällen die Purpurcurve zu oberst läuft; die Ungleichheit ist dadurch erklärt, dass in Roth die Purpurcurve über Gelb über Blau läuft, und in Violett die Purpurcurve über Blau über Gelb. Im ersten Falle liefert Blau nichts anderes als einen Beitrag zum Helligkeitsgrade; dasselbe geschieht im zweiten Falle von Gelb aus. Daher entsteht durch Mischung von Roth und Violett in geeignetem Verhältnisse Purpur.

An den beiden Enden sind die Ordinatenwerte nicht gleich null gesetzt, damit das Ordinatensystem geeignet sei, auch das Braun in Ultraroth und das Lavendelgrau in Ultraviolett als sinngemäße Ausführung der Curven aufzunehmen. Vor dem rothen Ende wird der Schnittpunkt der Gelb- und Blaucurve liegen. Das Verhältnis des Übergewichtes von Purpur über Blau zu Gelb über Blau, welches am rothen Ende 1 : 0·5 ist, wird im Ultraroth in das Verhältniss 1 : 0 übergehen. Die reine Purpurordinate wird jedoch von dem Werte für Schwarz verschwindend wenig oder gar nicht verschieden sein. Der Mischung von Rothpurpur mit relativ sehr großem Schwarzgehalte entspricht aber die Empfindung von rothpurpurgetöntem Dunkelbraun. Hinter dem violetten Ende wird auch ein Schnittpunkt der Blau- und der Gelbcurve

liegen, sodass das Verhältnis des Übergewichtes von Purpur über Gelb zu Blau über Gelb, welches am violetten Ende 1 : 0·5 ist, im Ultraviolett in das Verhältnis 1 : 0 übergeht. Die reine Purpurordinate wird jedoch nur verschwindend wenig oder gar nicht von dem Schwarzwerte verschieden sein. Dem Übergange der Verhältnisse von 1 : 0·5 bis 1 : 0 entspricht der Lavendelgrauton. Das Spectrum erscheint durch die beiden in Schwarz übergehenden Purpurpunkte in Ultraroth und in Ultraviolett im Kreise geschlossen.

Dieser zum Beispiele gewählte Verlauf der Curven enthält auch eine hypothetische Darstellung der Helligkeitsvertheilung im Spectrum. Setze ich den Ordinatenwert für Schwarz in allen Sehblättchen, wie es früher geschehen ist, = 0·1 *mm* der Zeichnung, so erhalte ich als absoluten Schwarzgehalt eines Abscissenpunktes des Spectrums den Ordinatenwert 0·4. Den Wert 0·1 darf ich für kein Sehblättchen, wenn es sich um den Ausdruck der Helligkeit handelt, als farblosen Lichtgehalt betrachten; wohl aber wird die Ordinate des anonymen Sehblättchens nach Abzug von 0·1 als eine der vier Componenten des farblosen Lichtes behandelt werden dürfen. Ich werde also die um 0·1 verminderte Ordinate für das anonyme Blättchen mit 4 multiplicieren und das Product als Ausdruck des absoluten Gehaltes an farblosem Lichte für diesen Abscissenpunkt des Spectrums nehmen. Der Gehalt an glanzlosem Weiß wird im Sinne der Hypothese durch das Dreifache der Differenz der anonymen Ordinate von der nächstgrößeren aus den drei Ordinaten für Purpur, Gelb und Blau auszudrücken sein. Dieser Ausdruck entfällt in einem Theile des Cyanblau, in Indigo und in Violett. Für den Farbengehalt bleiben dann nur zwei Ordinatenreste übrig (über Schnittpunkten nur einer), welche mit demjenigen Betrage genommen werden, mit welchem sie die Höhe der niedrigsten der drei farbengebenden Ordinaten Purpur, Gelb und Blau überschreiten. Den Helligkeitsgrad selbst kann ich dann durch einen Bruch ausdrücken, dessen Zähler durch die Summe vom farblosen Lichtgehalte und glanzlosem Weiß-Gehalte, dessen Nenner durch die Summe der vier Ordinaten.

mithin durch die Summe von Schwarzgehalt, Lichtgehalt, Weißgehalt und Farbengehalt dargestellt ist. In dieser Weise wird der Ausdruck für intensives farbloses Licht in großer Annäherung = 1, und der Ausdruck für die Helligkeit des absoluten Schwarz = 0.

Denkt man sich die Sehstoffe und ihre Wirkung weg, so liegt das Maximum des Helligkeitsgrades nahezu in *E*, und zwar in 70⁰ mit 0·9940. Lässt man jetzt die Sehstoffe und ihre Wirkung, die Curvenerhöhung, hinzutreten, so wird zu dem Gehalte an farblosem Lichte noch ein Weissgehalt hinzutreten, welcher die Helligkeitsvertheilung ändert. Gegen das kurzwellige Ende des Spectrums wird kein Weißgehalt hinzutreten. Durch den Ausfall der Sehstoffe wird das langwellige Ende des Spectrums an Helligkeit verlieren. Das Maximum der Helligkeit wird durch die Sehstoffe in der Richtung nach *D* verschoben. In der Nähe von *E* selbst sinkt der Helligkeitsgrad durch die Einwirkung der Sehstoffe, und zwar in 70⁰ von 0·9940 auf 0·9342 und in 72⁰ von 0·9938 auf 0·9318.

Diese Beziehungen sind geeignet, die Verhältnisse der totalen Farbenblindheit (derjenigen totalen Farbenblindheit, welche später als Lamproblepsie bezeichnet werden wird) aus den Verhältnissen der Normalsichtigkeit durch einfache Elimination der Sehstoffe abzuleiten.

Der Übergang der Farbentöne zeigt sich im Ordinatensystem der beigegebenen Zeichnung in folgender Weise veranschaulicht:

Verhältnis des Übergewichtes von Purpur über Blau zum Übergewichte von Gelb über Blau in

Roth:

		18⁰ . . .	1 : 0·7500
0⁰ . . .	1 : 0·5000	20⁰ . . .	1 : 0·7778
2⁰ . . .	1 : 0·5279	22⁰ . . .	1 : 0·8056
4⁰ . . .	1 : 0·5555	24⁰ . . .	1 : 0·8333
6⁰ . . .	1 : 0·5833	26⁰ . . .	1 : 0·8611
8⁰ . . .	1 : 0·6111	28⁰ . . .	1 : 0·8889
10⁰ . . .	1 : 0·6389	30⁰ . . .	1 : 0·9167

12° . . .	1 : 0·6667	32° . . .	1 : 0·9444
14° . . .	1 : 0·6945	34° . . .	1 : 0·9722
16° . . .	1 : 0·7222	36° . . .	1 : 1·0000

Verhältnis des Übergewichtes von Gelb über Blau zum Übergewichte von Purpur über Blau in

Orange:

36° . . .	1 : 1	42° . . .	1 : 0·7997
38° . . .	1 : 0·9456	44° . . .	1 : 0·6846
40° . . .	1 : 0·8807	46° . . .	1 : 0·5000

Verhältnis des Übergewichtes von Gelb über Blau zum Übergewichte von Purpur über Blau in dem an Orange grenzenden Theile von

Gelb:

46° . . .	1 : 0·5	48° . . .	1 : 0·1253

Punkt des neutralen Gelb: 1 : 0.

Verhältnis des Übergewichtes von Gelb über Purpur zum Übergewichte von Blau über Purpur in dem an Grün grenzenden Theile von

Gelb:

Punkt des neutralen Gelb:	1 : 0	54° . . .	1 : 0·4370
50° . . .	1 : 0·1490	56° . . .	1 : 0·4860
52° . . .	1 : 0·3214	57° . . .	1 : 0·5000

Verhältnis des Übergewichtes von Gelb über Purpur zum Übergewichte von Blau über Purpur in

Grün:

57° . . .	1 : 0·5000	70° . . .	1 : 0·7500
58° . . .	1 : 0·5192	72° . . .	1 : 0·7884
60° . . .	1 : 0·5577	74° . . .	1 : 0·8269
62° . . .	1 : 0·5962	76° . . .	1 : 0·8654
64° . . .	1 : 0·6346	78° . . .	1 : 0·9038
66° . . .	1 : 0·6731	80° . . .	1 : 0·9423
68° . . .	1 : 0·7116	82° . . .	1 : 0·9808
		83° . . .	1 : 1.

Verhältnis des Übergewichtes von Blau über Purpur zum Übergewichte von Gelb über Purpur in

Blaugrün:

83° . . .	1 : 1	86° . . .	1 : 0·6196
84° . . .	1 : 0·8120	Grenzpunkt zwischen Blaugrün und Cyan	1 : 0·5000

Verhältnis des Übergewichtes von Blau über Purpur zum Übergewichte von Gelb über Purpur in dem an Blaugrün grenzenden Theile von

Cyan:

Grenzpunkt zwischen Blaugrün und Cyan	1 : 0·5000	90° . . .	1 : 0·1407
88°	1 : 0·3473	92° . . .	1 : 0·0097
		Punkt des neutralen Blau	1 : 0

Verhältnis des Übergewichtes von Blau über Gelb zum Übergewichte von Purpur über Gelb in dem an Indigo grenzenden Theile von

Cyan:

Punkt des neutralen Blau . . .	1 : 0	106° . . .	1 : 0·2696
94° . . .	1 : 0·0691	108° . . .	1 : 0·3114
96° . . .	1 : 0·0947	110° . . .	1 : 0·3534
98° . . .	1 : 0·1277	112° . . .	1 : 0·3953
100° . . .	1 : 0·1536	114° . . .	1 : 0·4372
102° . . .	1 : 0·1944	116° . . .	1 : 0·4790
104° . . .	1 : 0·2277	117° . . .	1 : 0·5000

Verhältnis des Übergewichtes von Blau über Gelb zum Übergewichte von Purpur über Gelb in

Indigo:

117° . . .	1 : 0·5000	138° . . .	1 : 0·5776
118° . . .	1 : 0·5021	140° . . .	1 : 0·5918
120° . . .	1 : 0·5067	142° . . .	1 : 0·6085
122° . . .	1 : 0·5116	144° . . .	1 : 1·6284
124° . . .	1 : 0·5171	146° . . .	1 : 0·6524
126° . . .	1 : 0·5230	148° . . .	1 : 0·6821
128° . . .	1 : 0·5297	150° . . .	1 : 0·7197
130° . . .	1 : 0·5371	152° . . .	1 : 0·7690

132° . . .	1 : 0·5454	154° . . .	1 : 0·8361
134° . . .	1 : 0·5547	156° . . .	1 : 0·9332
136° . . .	1 : 0·5654	157° . . .	1 : 1.

Verhältnis des Übergewichtes von Purpur über Gelb zum Übergewichte von Blau über Gelb in

Violett:

157° . . .	1 : 1	164° . . .	1 : 0·9026
158° . . .	1 : 0·9915	166° . . .	1 : 0·8408
160° . . .	1 : 0·9707	168° . . .	1 : 0·7335
162° . . .	1 : 0·9427	170° . . .	1 : 0·5000

Diese Ziffern und diese graphischen Darstellungen sind, wie ich wiederholt betone, nur willkürliche Exemplificationen zum Zwecke der Veranschaulichung der Problemstellung. Die hier dargestellte Vertheilung der Farbentöne, der Intensitäten und der Helligkeitsgrade setzt voraus, dass die betreffenden Vertheilungen den Verhältnissen der Amplitudengrößen der Sehblättchen direct proportioniert sind. Will man diese Voraussetzung nicht machen, so werden sich andere Beziehungen der Sehblättchen-Bewegungen zur Vertheilung der Farbentöne, Helligkeitsgrade und Intensitäten construieren lassen, so dass dieses Ordinatensystem als Function zu diesen Bewegungen einen Sinn behält. Die Hauptfrage ist aber die, ob die wirklichen Verhältnisse in der Vertheilung von Farbe, Farbenton, Helligkeit und Intensität mit dieser Exemplification so nahe zusammenstimmen, dass die Grundzüge der hier vorgebrachten Hypothese durch die größtmögliche Abweichung der Wirklichkeit von dieser Exemplification nicht erschüttert werden.

Diese graphische Darstellung ist elastisch genug, um der weitest gehenden Abweichung der Wirklichkeit von dieser Exemplification angepasst werden zu können. Man stelle z. B. die Forderung, dass sich der Farbenton im ganzen Roth wie im ganzen Violett gar nicht verschieben dürfe. Lässt man die Purpurcurve in Roth mit der Gelbcurve und in Violett mit der Blaucurve genau congruent sein, so ist diese Forderung erfüllt. Die Farbentöne sind in beiden Fällen durch das Verhältniss 1 : 1 charakterisiert.

Die Farbenfolge selbst wird im normal gesehenen Spectrum niemals permutiert. Die Curven werden für das normal sehende Auge im großen und ganzen ihr Lagenverhältnis beibehalten, wenn auch der einzelne Schnittpunkt etwas nach rechts oder nach links zu schieben ist. Die Exemplification des Lagenverhältnisses der Curven kann ebenso leicht an einem Dispersions- als an einem Interferenz-Spectrum ausgeführt werden. Die Farbengrenzen sind hier unabhängig von Schwingungszahl und Wellenlänge des Lichtes lediglich physiologisch durch das Erregungsverhältnis der Sehblättchen definiert. Es ist ersichtlich, dass innerhalb der bekannten Farbenfolge jede als wirklich nachgewiesene Vertheilung von Farbenton, Helligkeit und Intensität nach dem Beispiel der hier gezeichneten Curven mit jedem Grade der Genauigkeit graphisch dargestellt werden kann, ohne dass eine solche Darstellung von der hier gegebenen Exemplification im großen und ganzen wesentlich abweichend ein anderes Lagenverhältnis der Curven ergeben kann.

Die von der Purpurcurve und der Abscisse eingeschlossene Fläche ist gleich groß mit jener, die von der Gelbcurve und der Abscisse gebildet wird und auch mit jener, welche von der Blaucurve und der Abscisse eingeschlossen ist. Betrachtet man die zwischen den gezeichneten Ordinaten liegenden Curvenstücke in der Annäherung als Gerade, so erhält man als Wert für jeden der drei Flächeninhalte 1707·84 mm^2. Wird eine andere Vertheilung der Farbetöne, Intensitäten und Helligkeiten vorgenommen, so müssen nicht wiederum die drei Flächeninhalte gleich groß ausfallen. Nun scheint es allerdings für eine Hypothese, welche das Weiß durch die Gleichheit der Erregung des Purpur-, Gelb- und Blaublättchens bedingt sein lässt, erforderlich zu sein, dass auch diese drei Flächeninhalte immer gleich groß seien, weil sonst das Spectrum nicht zu farblosem Lichte mit Weißgehalt zusammengeschoben werden könnte. Er scheint also durch die Forderung der Gleichheit dieser drei Flächen die Vertheilung der Farbentöne, Intensitäten und Helligkeiten derart schwierig zu sein, dass hier leicht die Hypothese mit der thatsächlichen

Vertheilung von Farbenton, Intensität und Helligkeit in Widerspruch gerathen kann, also befangen macht. Nun ist es aber in Wirklichkeit nicht nothwendig, dass diese drei Flächen gleich groß sein müssen. Es lässt sich über ihr Größenverhältnis selbst auf Grund dieser Hypothese der Weiß-Bedingung a priori gar nichts vermuthen. Dieses Paradoxon soll später unter dem Gesichtspunkte der Lichtmischung begründet werden. Daselbst soll auch die Beziehung der empirischen Farbengleichungen zur rechnerischen Construction von Grundempfindungscurven besprochen werden.

Die Annahme einer kleinen Anzahl von Sehblättchen steht in Übereinstimmung damit, dass das Licht innerhalb gewisser Grenzen im Spectrum einen nahezu gleichen Eindruck macht. Jeder Farbenton, der einer Grundfarbe entspricht und über einem Schnittpunkte der beiden anderen Farbencurven liegt, wird einen Grenzpunkt im Spectrum bilden, von welchem aus nach links und nach rechts die Farbenänderung die Richtung wechselt. So ist der Punkt des neutralen Gelb ein solcher Punkt, welcher das nach Orange neigende Gelb von dem nach Grün neigenden Gelb scheidet. Ebenso ist der Punkt des neutralen Cyanblau ein Grenzpunkt zwischen dem nach Blaugrün und dem nach Indigo neigenden Cyanblau. Ähnlich werden die Schnittpunkte der Farbencurven wirken, welche über der dritten Grundfarbe liegen, wie der Grenzpunkt zwischen Roth und Orange, der Grenzpunkt zwischen Grün und Blaugrün, der Grenzpunkt zwischen Indigo und Violett. Zwischen je zwei solchen ausgezeichneten Punkten ist eine Mannigfaltigkeit von Farbentönen ausgespannt, innerhalb welcher die Richtung der Veränderung der Farbentöne constant bleibt, wenngleich die Extreme weit auseinander liegen mögen, wie der neutrale Gelbpunkt und der Endpunkt von Grün. Liegen die Extreme nicht so weit auseinander, dann entsteht ein eigenthümlich gleichförmiger Eindruck der ganzen Strecke, wie z. B. in Roth, wofür vielleicht der Ausdruck Constanz der Veränderungsrichtung des Farbentones noch am bezeichnendsten ist. In Gelb ist im neutralen Gelbpunkte die Veränderungsrichtung gebrochen.

Die Farbenmannigfaltigkeit des Spectrums lässt sich, wenn man Purpur zur Ergänzung heranzieht, nicht durch eine in sich geschlossene Kreislinie symbolisieren, sondern durch ein Polygon, dessen Seiten der Constanz der Veränderungsrichtung und dessen Ecken den Brechungspunkten der Veränderungsrichtung entsprechen. Hätte jede Lichtschwingungszahl ihr besonderes Sehblättchen, dann müsste dieses Polygon in eine in sich zurückkehrende Curve übergehen; die Richtung der Veränderung der Farbentöne würde beständig geändert.

Die Purpur-, die Gelb- und die Blaucurve haben in dem Ordinatensystem je ein großes und ein zweites bedeutend kleineres Maximum. Zwischen beiden Maximen liegt Grün. Diese Einbuchtung der Curven lässt sich mit einer wahrscheinlichen Lichtabsorption in Zusammenhang bringen. Wenn z. B. die Sehstoffe hauptsächlich grünes Licht absorbieren, also purpurfarbig sind, und infolge dieser Absorption z. B. schneller zersetzt werden, dann wird die Zahl der im grünen Lichte in der Zeiteinheit schwingenden und dadurch wirksamen Sehstoffmolecüle besonders stark vermindert. Die Zahl der hier möglichen Vermuthungen ist aber zu groß, als dass man derzeit eine derselben in bevorzugender Weise verfolgen dürfte.

III.

Anwendung der Hypothese auf das Abklingen und Mitklingen der Farben.

Das bekannte Phänomen des Abklingens der Farben setzt nicht wie das complementäre Nachbild ein zweites Licht voraus, welches infolge der vorbereitenden Wirkung einer vorausgegangenen Beleuchtung nun anders wirkt, als es sonst gewirkt hätte. Es setzt vielmehr voraus, dass die Wirkung einer Beleuchtung durch Beendigung derselben und Ausschluss einer zweiten Beleuchtung zur Ruhe komme. Es werden daher

beim Nachklingen wesentlich dieselben Elemente in Action sein, welche eben während der Beleuchtung in Action gekommen waren. Über den Zusammenhang des Abklingens mit der hier construierten Hypothese lässt sich nichts nennenswert Neues sagen. Wenn der Eindruck Weiß nach Unterbrechung der Beleuchtung durch Blau, Violett und Roth nach Grau abklingt, so wird eben dies darauf hindeuten, dass die Molecüle der Sehstoffe, welche im Begriffe waren, der photochemischen Zersetzung entgegenzueilen, durch die plötzliche Unterbrechung der äußeren Anregung eben nicht der Zersetzung zugeführt werden, sondern mehr oder weniger langsam zur Ruhe kommen, und während ihrer Eigenschwingung fortfahren werden, die Sehblättchen zu erregen. Es ist nicht zur Erklärbarkeit des Phänomens erforderlich, dass alle zur Zersetzung vorbereiteten Molecüle zurückgehalten werden; es genügt, dass dies bei einer gewissen Menge der noch nicht zu sehr inducierten Molecüle der Fall sei. Wenn nun etwa die Molecüle des Blaustoffes intensiv aber kurze Zeit nachschwingen, diejenigen des Gelbstoffes schwächer aber länger nachschwingen, und diejenigen des Purpurstoffes bezüglich der Intensität der Bewegung zuerst ein mittleres Verhalten zeigen, dann in diesem mittleren Verhalten beharren, während der Einfluss der Blaustoffmolecüle sinkt, und endlich die Purpurstoffmolecüle mit den Gelbstoffmolecülen zusammenwirken, während der Einfluss der Blaumolecüle unter den Einfluss beider gesunken ist, so macht dies die Abfolge Blau, Violett, Roth erklärbar.

Unter dem „Mitklingen" einer Farbe verstehe ich die Einwirkung einer beleuchteten Netzhautstelle auf ihre Umgebung im Sinne der Ausbreitung der gegebenen Erregung. Hier sind zwei Fälle zu unterscheiden: die Einwirkung einer beleuchteten Stelle auf die unbeleuchtete Umgebung und die Einwirkung einer beleuchteten Stelle auf die anders beleuchtete Umgebung. Der erstere Fall ist der einfachere und für das Verständnis des Mitklingens wichtigere.

Die Einwirkung einer beleuchteten Netzhautstelle auf ihre unbeleuchtete Umgebung besteht im wesentlichen darin, dass

die Umgebung die Farbe der beleuchteten Stelle in größerer Helligkeit und geringerer Intensität hervorruft. Dieser Fall des Mitklingens lässt sich in folgender Anordnung in einfachster Weise demonstrieren: Carton wird mit tief mattschwarzem Papier überzogen und sorgfältig auf wirkliche Undurchsichtigkeit geprüft. Die Cartonstücke erhalten die Größe und Form von Stereoskopbildern, so dass sie in ein Brewstersches Stereoskop eingeschoben werden können, dessen Kastenwände gut geschwärzt sind, und in welches auch nicht von den Seiten des Bildes Licht eindringt. Der Carton erhält für jede Kammer des Stereoskopes einen kreisförmigen Ausschnitt von 4 *cm* Durchmesser. Dieser Ausschnitt wird mit transparentem Seidenpapier auf der Rückseite des Cartons überspannt. Je nach Umständen wird eine bis vier Lagen Seidenpapier genommen, damit das Transparent möglichst gesättigt aber dennoch nicht lichtschwach werde. In das Centrum jeder transparenten Scheibe kommt ein kleiner schwarzer Kreis von 12 *mm* Durchmesser, welcher aus Carton und tief mattschwarzem Papier gebildet und vor dem Ausschneiden auf seine wirkliche Undurchsichtigkeit geprüft worden ist. Bei binocularem Sehen erscheint im Stereoskope ein kleiner schwarzer Kreis, umgeben von einem transparenten Kreisringe, welcher wiederum von einer schwarzen Umgebung eingeschlossen ist.

Ich stelle nun z. B. das Stereoskopbild mit dem weißen transparenten Ringe ein und halte beide Augen längere Zeit geschlossen, damit die Einflüsse vorhergehender Beleuchtung verschwinden. Nun öffne ich die Augen und fixiere sofort binocular den kleinen schwarzen Kreis. Nach einiger Zeit hellt sich der schwarze Kreis auf; er erscheint wie mit einem weißen Schleier verhüllt. Die erforderliche Fixationszeit ist verschieden; sie beträgt bei bewölktem Himmel (allerdings eine sehr vage Lichtbestimmung) durchschnittlich 15 Secunden. Verfahre ich in gleicher Weise mit purpurfarbigen, rothen, gelben, grünen und blauen Transparenten, so ist das Resultat immer die Verhüllung des schwarzen Kreises mit einem compacten Schleier von der Farbe des transparenten Ringes, nur mit etwas größerer Helligkeit der Farbe.

Wiederholt man die Versuche, indem man die Bilder im Stereoskopkasten nach Entfernung der Prismen ohne Hilfe der letzteren vereinigt, so ist das Resultat unverändert. Es handelt sich also nicht um reflectiertes Licht.

Nimmt man die Stereoskopbilder heraus, bedeckt man eines der Bilder mit mattschwarzem Papier, und fixiert man das andere im reflectierten Tageslichte binocular, so erhält man dieselben Resultate, nur entsprechend schwächer.

Das Mitklingen der Farben erkläre ich mir dadurch, dass die in der beleuchteten Stelle der Netzhaut erzeugten Sehstoffmolecüle nach allen Seiten hin in schwingendem Zustande diffundieren. Viele derselben werden in der beleuchteten Stelle selbst zersetzt werden; viele andere werden noch vor ihrer Zersetzung in die dunklen Stellen auswandern, namentlich vom Rande her, und dort in schwingendem Zustande eintreffen. Weil aber hier Finsternis herrscht, so werden die Sehstoffmolecüle nicht zersetzt werden, ihre Schwingungen werden nicht durch Licht verstärkt werden, sondern langsam zur Ruhe kommen. Die Sehstoffmolecüle werden bei gleichen Diffusionsverhältnissen in demjenigen Verhältnisse ihrer Zahl und Schwingungsintensität im dunkeln Theile eintreffen, in welchem sie im beleuchteten Theile wirksam waren. Sie werden daher bewirken, dass die Farbe des gegebenen Lichtes sich nach allen Seiten ausbreitet. Die im Dunkeln eingetroffenen Molecüle würden, indem sie langsam zur Ruhe kommen, eigentlich die Phänomene des Abklingens hervorrufen; weil aber immer neue Molecüle nachrücken, so wird das Abklingen durch das Mitklingen übertönt.

Das Phänomen des Mitklingens zeigt sich in dem kleinen schwarzen Kreise sehr deutlich, weil hier die Sehstoffmolecüle von allen Seiten einströmen und nirgends hinausströmen, oder wenn sie hinausströmen, durch eine weit größere Zahl von neuen Einwanderern ersetzt werden. Von dem transparenten Ringe nach außen nimmt das Mitklingen rasch ab, was schon daraus erklärlich ist, dass die auswandernden Sehstoffe nicht nur nicht concentriert sondern sogar auf eine größere Fläche vertheilt werden. In die schwarzen Theile, auf welche kein Licht

fällt, wandern die Molecüle der Sehstoffe bereits in schwingendem Zustande ein. Weil aber die Wirkung der Sehstoffe nach dieser Hypothese nicht auf ihrer Zersetzung als solcher sondern auf der der Zersetzung vorhergehenden Schwingung beruht, so sind diese Molecüle in den verfinsterten Theilen sehr wirksam, weil sie hier fortschwingen können, ohne eine Zersetzung zu erfahren, die bei gesteigerter Schwingungsintensität eintreten würde.

Vertausche ich den schwarzen Grund mit einem farbigen, und beleuchte ich die gesammte Figur, so erhalte ich im auffallenden Lichte das Szilische Phänomen.[1] Nehme ich den inneren Kreis in undurchsichtigem Grün, den transparenten Kreisring in rother Farbe, und die Umfassung des rothen Kreisringes wiederum in undurchsichtigem Grün, stelle ich diese Figur in dem Stereoskope ein und beleuchte ich die Figur durch den Spiegel des Stereoskopes, so zeigt sich nach kurzer Fixierung des grünen Kreises auf diesem Kreise ein heller glanzähnlicher Schimmer. Dieser Schimmer ist ein zweites Bild der Scheibe, das durch Bewegung des Auges in den transparenten rothen Ring geschoben werden kann. Der in den Kreisring rückende Theil des zweiten Bildes erscheint in der Farbe des Ringes, jedoch viel gesättigter; der vom Schimmer frei werdende Theil des inneren Kreises erscheint in der ursprünglichen Farbe, jedoch auch bedeutend gesättigter.

Das Szilische Phänomen erkläre ich gleichfalls durch das Mitklingen. Von dem rothen Ringe gelangen schwingende Sehstoffmolecüle in den inneren grün beleuchteten Kreis; hier würden sie, wenn die grüne Beleuchtung nicht wäre, Rothempfindung bedingen; so aber vereinigen sie sich mit einem Theile der Wirkung der grünen Beleuchtung zu farblosem Lichte, welches der Aufhellung des größeren übrig bleibenden Theiles von Grün dient. Es entstehen zwei Bilder des Kreises; eines durch das vom grünen Kreise reflectierte Licht, und ein zweites, gebildet durch eine Schichte im Sinne

[1]) Zeitschrift für Psychologie und Physiologie der Sinnesorgane. Bd. III. Seite 359 ff.

von Roth schwingender Molecüle. Gelangt daher durch eine Bewegung des Auges eine Stelle des Ringes auf die so präparierte Netzhautstelle, so wird infolge der Sättigung mit Sehstoffen ganz besonders intensiv roth gesehen werden. Aus dem analogen Grunde wird der frei werdende Theil der grünen Scheibe intensiver grün gesehen, weil die Netzhaut hier mit Sehstoffmolecülen versehen ist, welche im Sinne von Grün schwingen, wozu nun die Wirkung grüner Beleuchtung hinzukommt.

Gibt man dasselbe Blatt mit dem rothen transparenten Ringe auf grünem Grunde in ein geschlossenes Stereoskop, das zur Verhütung von Täuschungen gar keinen Spiegel hat, und vereinigt man die Bilder ohne Hilfe der Prismen, damit auch diese kein Licht reflectieren können, so erscheint ein transparenter rother Kreis auf schwarzem Grunde. Hält man das Auge längere Zeit vor der Beobachtung geschlossen, und fixiert man dann sofort den schwarz erscheinenden inneren Kreis, so wird derselbe nach kurzer Zeit mit leuchtendem Roth übergossen. Das gleiche Roth war auch früher da, aber es ging in der Aufhellung des Grün unter.

Die Versuche mit zwei Farben gelingen auch außerhalb des Stereoskopes im reflectierten Lichte bei schwächerem Tageslichte und binocularer Fixierung eines Kreises nach Verdeckung des anderen, nur sind die Resultate dem schwächeren Reize entsprechend weniger auffallend, bei entsprechend herabgesetzter Beleuchtung wie ein Hauch.

Szili, welcher das Phänomen der „flatternden Herzen“ zu erklären beschäftigt war, ging von farbigen Marken auf farbigem Grunde aus, und kam zuletzt zu den Combinationen von Grau und Schwarz. Ich bin hier von der Combination Weiß-Schwarz und Farbe-Schwarz ausgegangen, und zuletzt zum Szilischen Phänomen gekommen. Das Mitklingen der Farbe auf schwarzem Grunde ist nichts wesentlich Neues, sondern das Szilische Phänomen selbst, auf den einfachsten und daher erklärenden Fall reduciert.

Die mitklingende Farbe klingt bei geschlossenen Augen ebenso gut ab wie die ursprüngliche. Die klingende wie die

mitklingende Farbe haben ja die gleichen Bedingungen, nämlich schwingende Sehstoffmolecüle Ob nun diese Molecüle an Ort und Stelle durch das Licht in Schwingung versetzt wurden, oder ob sie in schwingendem Zustande auswanderten und anderswo unzersetzt zur Ruhe kommen, dies ist für das Zustandekommen des Abklingens im allgemeinen gleichgiltig. In den Einzelheiten ist das Abklingen der mitklingenden Farbe von dem Abklingen der ursprünglich klingenden verschieden. Ich fixiere z. B. außerhalb des Stereoskopes bei mäßiger Beleuchtung binocular im auffallenden Lichte eine Viertel- bis eine ganze Minute lang den schwarzen Kreis in rothem Ringe. Schließe ich die Augen und schütze ich sie außerdem noch vor dem Eindringen des Lichtes durch die Lider, so sehe ich im dunklen Sehfelde einen rothen Kreis in blaugrünem Ringe, scharf begrenzt und umgeben von einem rothen Hofe.

Dieses paradoxe Verhältnis verliert das Befremdende, wenn man annimmt, was hier immer geschieht, dass die Sehstoffmolecüle nicht durch ihre Zersetzung als solche, sondern durch die der Zersetzung vorhergehende Schwingung wirken. Diejenigen Molecüle, welche in die verdunkelten Theile der Netzhaut gelangt sind, und im Sinne von Roth schwingen, befinden sich nach Abschluss der Beleuchtung in denselben Verhältnissen wie vor der Beleuchtung, weil sie ja dieser nicht mehr ausgesetzt waren. Sie werden daher fortfahren, Rothempfindung zu bedingen, und nur langsam zur Ruhe kommen. Anders verhält es sich mit denjenigen Sehstoffmolecülen, welche direct beleuchtet waren. In dem rothbeleuchteten Ringe waren Purpur- und Gelbstoffmolecüle in lebhafter Schwingung, aber auch in beständiger Zersetzung und Ersetzung durch Neubildung; sie haben wahrscheinlich nicht so sehr durch große Zahl als durch Schwingungsintensität gewirkt; wird die Beleuchtung plötzlich unterbrochen, so bleibt nur eine kleine Zahl von Molecülen zum Abklingen zurück; in dem schwarzen Kreise hingegen, sowie in der schwarzen Umfassung des rothen Ringes findet keine Zersetzung statt; hier konnten die in schwingendem Zustande

auswandernden Molecüle sich in größerer Zahl ansammeln. Die Blaustoffmolecüle im rothen Ringe, welche in schwächerer Schwingung waren, und daher von der Zersetzung im Lichte weiter entfernt waren, sind bei plötzlichem Abbruch der Beleuchtung des rothen Ringes im Vortheile über die Purpur- und Gelbstoffmolecüle. Die geringere Intensität ihrer Schwingung ist gerade die Ursache dafür, dass sie in größerer Zahl erhalten bleiben und im Dunkeln langsam zur Ruhe kommen. Daher klingt der rothe Ring in der complementären Farbe ab.

Wähle ich zum Versuche einen schwarzen Kreis in gelbem Ringe, einen schwarzen Kreis in grünem Ringe, in blauem und in purpurfarbigem Ringe, so erhalte ich analoge Resultate. Die mitklingende Farbe klingt in ihrer Art ab, die durch Beleuchtung an Ort und Stelle entstandene Farbe klingt in der complementären Farbe ab. Die Erklärung bleibt die gleiche.

Wähle ich zum Versuche einen schwarzen Kreis in weißem Ringe, so erhalte ich den bekannten Hering'schen Versuch [1]), welcher nach Unterbrechung der Beleuchtung einen hellen Kreis in schwarzem Ringe, umgeben von einem scharf begrenzten, farblos hellen Hofe erkennen lässt. Auch hier ist die gleiche Erklärung anwendbar. Die schwingenden Sehstoffmolecüle, welche während der Fixation des Bildes den weißen Schleier über dem schwarzen Kreise bilden, können zwar während der Beleuchtung nicht so mächtig wirken, wie diejenigen in der beleuchteten Stelle, aber ihre Schwingungen können lange anhalten, während die scharf beleuchteten Molecüle, welche in rascher Zersetzung begriffen sind, der immer ebenso rasche Neubildung folgt, bei plötzlicher Unterbrechung der Beleuchtung in der augenblicklichen Bilanz fast null geben, weil die hohe Erregung zur Zersetzung führt, und alle drei Sorten von Sehstoffen gleich betheiligt sind.

Wenn die Hypothesen der Sehstoffmolecüle und der Sehfäden zugleich festgehalten werden, so folgt daraus eine Annäherung der abklingenden Farben an das farblose Licht.

---

[1]) Zur Lehre vom Lichtsinne 1878. Erste Mittheilung. § 2.

In dem Maße nämlich, als die Erregung der Sehblättchen im Sehfaden durch die Sehstoffmolecüle relativ viel geringer ist. als im Lichte, in demselben Maße kann sich die Erregungsform des Sehfadens von derjenigen durch directes Licht weniger unterscheiden. Das heißt, die abklingenden Farben werden stark verdünnt erscheinen. Dies wird durch die Beobachtung bestätigt. Der schwarze Kreis im weißen Ringe klingt nicht als weißer, sondern als farblos heller Kreis in schwarzem Ringe ab, umgeben nicht von einem weißen, sondern von einem farblos hellen Ringe. In analoger Weise ergeben die übrigen Beobachtungen mit farbigen Ringen leuchtende Abklänge.

Eine beleuchtete Stelle der Netzhaut wird nicht nur an die dunkle Umgebung schwingende Sehstoffmolecüle durch Diffusion abgeben, sondern auch der dunklen Umgebung das etwa vorhandene Bildungsmaterial für Sehstoffe entziehen. Das Bildungsmaterial wird an die Stelle des lebhaftesten Verbrauches abströmen. In der beleuchteten Stelle werden infolge dessen größere Quantitäten von Sehstoffen gebildet werden, und zwar um so größere, je verdunkelter die Umgebung ist. Ein kleines weißes Viereck auf schwarzem Grunde erscheint bekanntlich heller als ein gleiches auf grauem Grund. Ein farbiges kleines Viereck auf schwarzem Grunde erscheint heller als ein gleiches auf grauem Grunde; das letztere erscheint gesättigter und dunkler. Infolge dessen, dass die beschattete Stelle der Netzhaut von der beleuchteten ausgeschöpft wird, wird der Helligkeitsgrad und die gesammte Intensität der der beleuchteten Stelle entsprechenden Empfindung erhöht. Das Schwarz erscheint infolge dessen umso tiefer. Da nun die Netzhaut niemals ganz frei von vorräthigem Sehstoff zu sein scheint, wenngleich die Hauptmengen erst zur Zeit des Verbrauches gebildet werden, so ist eine Auspumpung einer verdunkelten Stelle durch eine beleuchtete noch erforderlich, um die Bedingung der Schwarzempfindung herzustellen. Die Abwesenheit von Licht genügt nicht; es ist die Abwesenheit der Sehstoffe selbst erforderlich, weil diese ja auch durch die Körpertemperatur in mäßige Schwingung

versetzt werden können. In diesem Sinne kann man eine Variation der Erklärung des sehr richtigen Hering'schen Satzes versuchen, die Schwarzempfindung sei eine Wirkung objectiven Lichtes.

Bei dem Versuche mit einem kleinen weißen Vierecke auf schwarzem Papier wird die geringe Menge des vom schwarzen Papiere reflectierten Lichtes nur wenig Bildungsmaterial in Sehstoffe verwandeln und überdies in seiner Wirksamkeit durch die Auspumpung der verdunkelten Stelle von Seite der beleuchteten geschwächt. Graue Flächen hingegen werden nicht erschöpfend auf die Umgebung wirken. Der Umsatz von Bildungsmaterial in Sehstoffe wird hier nicht allzu rasch erfolgen. Diese Flächen wirken aber auch nicht belebend auf die Umgebung, weil sie das durchströmende Bildungsmaterial nicht unbenützt und unvermindert durchströmen und wegströmen lassen. Das weiße oder aber farbige Viereck erscheint auf grauem Grunde unverändert, also im Verhältnisse zu dem auf schwarzem Grunde veränderten dunkler und gesättigter. Die Constrastwirkung zwischen Schwarz und seinem Gegenstücke, controliert durch Grau und das gleiche Gegenstück, erscheint umso auffallender, je leichter die Ausschöpfung der beschatteten Stelle gemacht wird. Die Darstellung gelingt daher am besten durch sehr kleine Figuren, etwa Kreise von 5 bis 8 *mm* Durchmesser auf schwarzem, beziehungsweise grauem Grunde, weil hier die Wirkungen der Nachbarschaft von allen Punkten der Peripherie rasch im Centrum zusammentreffen.

Dieser simultane Contrast steht in Verbindung mit dem früher besprochenen Mitklingen. Beim Mitklingen strömen Sehstoffmolecüle in schwingendem Zustande aus der beleuchteten Umgebung in eine kleine beschattete Stelle der Netzhaut zusammen; bei dem soeben besprochenen Contraste strömt Bildungsmaterial für Sehstoffe aus der beschatteten Umgebung in eine kleine beleuchtete Stelle der Netzhaut zusammen. Eine beleuchtete Stelle empfängt von der verdunkelten Bildungsmaterial für Sehstoffe, und gibt an dieselbe Sehstoffe zurück. Durch den ersten Process wird sie selbst

aufgehellt, durch den zweiten die beschattete Umgebung. Eine beschattete Stelle gibt Bildungsmaterial für Sehstoff an die beleuchtete Stelle ab, wodurch sie selbst für sich die Empfindung eines tieferen Schwarz bedingt; sie empfängt aber fertige Sehstoffe zurück, wodurch die Bedindung der empfundenen Aufhellung geschaffen wird. Diese beiden Processe der Aufhellung und der Verdunklung, welche an die beschattete Stelle zugleich gebunden sind, geben sehr ungleiche Bilanzen. Es kommt auf die Versuchsanordnung an, welcher von beiden Processen als der stärkere bemerkbar gemacht werden soll; daher der große Unterschied zwischen einem kleinen schwarzen Kreise auf weißem oder farbigen Grunde und einem kleinen weißen oder farbigen Kreise auf schwarzem Grunde.

Diese Mechanik der Entziehung des Bildungsmateriales für die Sehstoffe sowie der infolge früherer Beleuchtung unzersetzt zurückgebliebenen Sehstoffe durch beleuchtete Stellen macht es verständlich, dass die eigentliche Schwarzempfindung erst unter dem Einflusse des äußeren Lichtreizes zustande kommt. Die Abwesenheit von Licht genügt nicht, weil die Netzhaut mit Resten von unzersetzten Sehstoffen imprägniert ist, welche auch in Abwesenheit des Lichtes auf chemischem Wege zersetzt werden und die Sehblättchen erregen können. Es ist sogar wahrscheinlich, dass die Sehstoffe in Abwesenheit des Lichtes nicht nur zersetzt, sondern auch auf einem anderen chemischen Wege gebildet werden, und in der Zeit zwischen Entstehung und Zersetzung eine Eigenschwingung haben, durch welche sie auf die Sehblättchen wirken. Auch kann eine allgemeine und alle vier Sehblättchen gleichmäßig treffende Steigerung der minimalen Erregung der Sehblättchen durch irgend einen physiologischen Process hinzukommen, wodurch ein Gehalt an farblosem Lichte auch in Abwesenheit des äußeren Lichtreizes geschaffen werden kann. Scharfe Umrisse, wie solche ein durch Licht entwickeltes Bild besitzt, werden nicht auftreten. Dem flüssigen und schwimmenden Charakter der Sehstoffe und anderer Agentien entsprechend werden sich wallende Nebel einstellen. Die Beleuchtung einer

Netzhautstelle wird daher geeignet sein, die beschatteten Stellen derselben Netzhaut von allen erregenden Substanzen vorübergehend zu befreien. Die etwa aufgespeicherten Sehstoffe wandern durch Diffusion an die Stellen des stärksten Verbrauches. Gleichzeitig beginnt aber auch eine Einwanderung neugebildeten Sehstoffes in die beschattete Stelle, wodurch eine allmähliche Aufhelluug derselben (Mitklingen) und ein helles Nachklingen nach Abbruch der Beleuchtung durch das Schließen der Augenlider bedingt ist. Das anfänglich tiefe Schwarz eines schwarzen Streifens auf weißem Grunde lässt sich daher nicht dauernd erhalten. Der weiße Grund hingegen, auf welchem die Zersetzung der Sehstoffe lebhaft ist und daher die Bedingungen für die Aufspeicherung ungünstig sind, wird die Tendenz haben nach Hellgrau zu sinken, oder zum mindesten nicht weiter aufgehellt werden. Die dem schwarzen Streifen entsprechende Netzhautstelle wird hingegen besonders geeignet sein, bei nachträglicher Beleuchtung ein besonders helles Weiß hervorzubringen, und auf seine neue weiße Umgebung materialentziehend, daher verdunkelnd wirken. In dieser Weise erkläre ich mir den Versuch Herings[1]): „Fixiere ich einen schwarzen Streifen auf weißem Grunde und ziehe nach einer Weile den Streifen rasch weg oder schiebe ein gleich weißes Blatt darüber, so sehe ich an Stelle des schwarzen Streifens ein Weiß, das viel heller und reiner ist als das Weiß der übrigen Fläche und besonders von seiner nächsten Umgebung absticht, welche häufig schmutzigweiß oder hellgrau erscheint (Dunkelhof).“ Längeres Weißsehen wird, soferne nicht durch hohe Lichtintensität eine vorübergehende abnorme Steigerung der Secretion des Bildungsmateriales verursacht wird, eine vorübergehende Erschöpfung des örtlich vorhandenen Bildungsmateriales bewirken können, und dadurch die Disposition für die Empfindung Tiefschwarz begünstigen. „Man erhält die Empfindung eines tief-dunklen Schwarz nur dann, wenn man daneben die des Hellen hat oder die letztere kurz zuvor an

[1]) Hering. Zur Lehre vom Lichtsinne. Fünfte Mittheilung, § 34, Experiment 4.

derselben Stelle hatte, am besten wenn beide Bedingungen zugleich erfüllt sind, wenn man also z. B. ein Stück weißes Papier auf ein größeres Stück schwarzen Sammtes legt, das Papier bei nicht zu greller Beleuchtung einige Zeit fixirt und dann auf den schwarzen Sammt blickt; an der Stelle des negativen Nachbildes erscheint dann der Sammt in besonders tiefem Schwarz". [1])

Je kleiner eine weiße Stelle auf schwarzem Grunde ist, desto leichter wird sie von der Umgebung her durch Difussion mit Bildungsmaterial für Sehstoffe versehen werden, und desto concentrierter wird das Bildungsmaterial sein. Je kleiner eine schwarze Stelle auf weißem Grunde gemacht wird, desto leichter werden ihr die vorräthigen Sehstoffe von der Umgebung entzogen; allerdings wird sie auch nach einiger Zeit umso leichter mit Sehstoffmolecülen in schwingendem Zustande versehen werden und mitklingen. Die Vertheilung der Flächen bei gleichbleibendem Flächeninhalte wird daher das Empfindungsresultat ändern, wie schon Mach gezeigt hat. „Legt man auf einen unbegrenzten schwarzen Grund ein weißes Quadrat, so zeigt dies eine gewisse Contrasthelligkeit." Schneidet man aus der Mitte desselben ein kleines Quadrat aus und legt man es daneben, so wächst die Helligkeit des Weiß, trotzdem dass der gesammte Flächeninhalt der gleiche geblieben ist. „Dies deutet auf eine Wechselwirkung der Netzhautstellen und zwar auf eine desto stärkere, je näher sich die Netzhautstellen sind. Es geschicht eben in dem Versuche nichts anderes, als dass einige schwarze Stellen einigen weißen näher rücken." [2])

Dem Mitklingen wesensverwandt ist das Phänomen der Hebung aneinandergrenzender complementärer oder annähernd complementärer Farbenflächen durch sogenannten simultanen Contrast. Es möge z. B. eine gelbe Fläche an eine blaue grenzen. In der gelb beleuchteten Stelle der Netzhaut werden

---

[1]) Aus Hering, Lehre vom Lichtsinne. Vierte Mittheilung § 23: „Die Empfindung des eigentlichen Schwarz entsteht wie die des Weiß unter dem Einflusse des objectiven Lichtes."

[2]) Über die physiologische Wirkung räumlich vertheilter Lichtreize. IV. Sitzungsber. d. Wiener Ak. d. W. 57. Bd. S. 11; 1868.

nicht nur Gelbstoff-, sondern auch Purpurstoff- und Blaustoffmolecüle gebildet werden. Vielleicht wird sogar mehr Blaustoff als Gelbstoff gebildet; die Gelbstoffmolecüle schwingen aber in diesem Lichte besonders lebhaft. Wäre nun die angrenzende Fläche nicht blau beleuchtet, sondern im Schatten, so würden Sehstoffmolecüle aller Arten in die Umgebung diffundieren; die Gelbstoffmolecüle wären hier die wirksamsten, weil sie im Zustande der relativ lebhaftesten Schwingung auswandern; die vielleicht relativ größere Zahl der Blaustoffmolecüle kommt weniger in Betracht, weil diese Molecüle weniger lebhaft schwingen, also weniger für die Empfindung wirksam sind. Ist also die angrenzende Fläche im Schatten, so wird das Phänomen des Mitklingens in gleicher Farbe eintreten. Ist aber die angrenzende Fläche kurzwellig, etwa sozusagen blau beleuchtet, so ändern sich die Verhältnisse für die Empfindung ganz bedeutend. Die zahlreichen Molecüle von eingewandertem Blaustoff werden im kurzwelligen Lichte in lebhafte Schwingung gerathen, und die Umgebung wird nicht in gelber Farbe mitklingen, sondern lebhafter blau gesehen werden; die Wirkung der in das blaue Licht eingewanderten Blaustoffmolecüle verbindet sich nämlich mit der Wirkung der im blauen Lichte erzeugten Blaustoffmolecüle. Das blaue Licht verhält sich in Folge der Einwanderung von Blaustoff so, als wäre seine Fähigkeit in diesem kurzweiligen Lichte Blaustoff zu erzeugen, erhöht worden; in Wirklichkeit findet wahrscheinlich diese Cooperation des gelben Lichtes mit dem blauen zur Verstärkung der Blauempfindung statt; in analoger Weise cooperiert das blaue Licht mit dem gelben zur Verstärkung der Gelbempfindung.

Eine intensive Beleuchtung, welche die Sehstoffmolecüle durch lebhafte Schwingung einer raschen Zersetzung zuführt, wird der Abgabe von schwingenden Sehstoffmolecülen in die Umgebung ungünstig sein. Der kurze Weg aus einer Stelle im Lichte in den Schatten wird noch immer zu lang sein, als dass ihn ein lebhaft schwingendes Sehstoffmolecül unzersetzt zurücklegen könnte. Daraus wird es erklärlich, warum die simultanen Contrasteinflüsse zwischen farbigen Papieren

leichter auffällig werden, wenn die farbigen Flächen mit weißem Seidenpapier oder mit mattem Glas bedeckt werden.

IV.

Anwendung der Hypothese auf das complementärfarbige Nachbild in einer nachfolgenden Beleuchtung und auf die Lichtmischung.

Von dem Mitklingen und Abklingen verschieden ist das complementärfarbige Nachbild in einer nachfolgenden Beleuchtung. Das Mitklingen betrifft die Wirkung eines und desselben Lichtes auf beschattete also auf andere als die beleuchteten Netzhautstellen. Das Abklingen betrifft die Nachwirkung eines und desselben Lichtes auf dieselbe beleuchtet gewesene Netzhautstelle. Das complementärfarbige Nachbild in einer nachfolgenden Beleuchtung betrifft die Cooperation der Wirkung einer vorausgegangenen Beleuchtung mit einer anderen nachfolgenden Beleuchtung auf dieselben Netzhautstelle.

In der hier vorgeführten Hypothese wird angenommen, dass die Sehstoffe nicht in der Netzhaut aufgespeichert seien, sondern im Falle der Entwicklung eines Bildes erst durch das Licht aus einem Bildungsmateriale für Sehstoffe erzeugt werden. Dieses Bildungsmaterial werde wahrscheinlich in der Chorioidea erzeugt, und sei durch Diffusion in der Netzhaut vorräthig, und zwar an verschiedenen Netzhautstellen in ungleicher Concentration. Das Licht erzeugt sich, bildlich gesprochen, seinen Bedarf an Sehstoffen von Fall zu Fall selbst. Der Sehpurpur ist möglicher Weise ein Gemenge von Bildungsmaterialien für die drei Sehstoffe; vielleicht aber steht er nur in genetischer Beziehung zu dem Bildungsmateriale. Im Centrum der Netzhaut sei das Bildungsmaterial sehr verdünnt.

Wird eine Beleuchtung, welche Sehstoffe in bestimmtem Mengenverhältnisse erzeugt hat, abgebrochen, so werden nicht

alle Sehstoffmolecüle der Zersetzung zugeführt worden sein. Es wird immer einige geben, welche in schwingendem Zustande langsam zur Ruhe kommen und infolge dessen an der beleuchtet gewesenen Stelle aufgespeichert werden, soferne sie nicht durch Diffusion auswandern oder durch andere Ursachen rascher und ausgiebiger vom Platze bewegt werden. Namentlich jene Sehstoffe werden zu vorübergehender Aufspeicherung gelangen, deren Molecüle in dem betreffenden Lichte zwar leicht erzeugt, aber nur in träge Schwingung gebracht, daher nicht leicht zersetzt werden, dafür aber auch in diesem Lichte für die Empfindung wenig wirksam waren. Die Hypothese trifft hier mit der Hering'schen Erklärung der complementärfarbigen Nachbilder in der Hauptsache zusammen. Hering nimmt bekanntlich an, dass diese Nachbilder nicht durch vorübergehende Erschöpfung der Netzhautstellen entstehen, wie man bis zu ihm geglaubt hatte, sondern im Gegentheile durch eine Art Imprägnierung der Netzhaut mit entgegengesetzt wirkenden Sehstoffen infolge des Sehvorganges. Insoferne weicht die hier entwickelte Hypothese ab, als es sich nicht um antagonistische Processe handelt, sondern nur um Begünstigungsverhältnisse, die durch die Änderung der Wellenlängen in ihr Gegentheil verkehrt werden können. In Orange ist Blaustoff wirksam und in Cyanblau Gelbstoff: der Gelbstoff ist nur in Orange wirksamer als der Blaustoff, und der Blaustoff in Cyanblau wirksamer als der Gelbstoff. Es handelt sich ferner nicht um eine Empfindungszuordnung zur Entstehung der Sehstoffe und auch nicht um eine solche zur Zersetzung derselben; hingegen wird die Empfindung ausschließlich der Schwingung der Sehstoffmolecüle zugeordnet gedacht.

Durch diese Unabhängigkeit der Bildungs- und Zersetzungsprocesse verschiedener Sehstoffe von einander wird es möglich, Fälle der Farbenblindheit wie Schwarz-Blausichtigkeit und Schwarz-Gelbsichtigkeit durch Vorkommen eines einzigen Sehstoff-Bildungsmateriales ohne Schwierigkeit der Hypothese in sich und a priori zu erklären. Durch die Hypothese ist keine Beschränkung auf eine bestimmte Farben-

combination bei partieller Farbenblindheit vorgeschrieben und auch die Annahme einer individuell verstärkten oder geschwächten Empfänglichkeit für eine bestimmte Grundfarbe möglich.

Wird nun eine normal sehende Netzhautstelle von einem Lichte bestimmter Wellenlänge beleuchtet, und die Beleuchtung abgebrochen, so werden an der beleuchtet gewesenen Stelle Sehstoffmolecüle in schwingendem Zustande unzersetzt übrig bleiben und zur Ruhe kommen. Gerade die am lebhaftesten in diesem Lichte schwingenden Molecüle werden in geringster Zahl übrig bleiben, weil sie rasch der Zersetzung zugeführt werden, und die zuletzt erzeugten Molecüle beste Aussicht haben, unzersetzt zur Ruhe zu kommen. Die weniger lebhaft schwingenden, welche in diesem Lichte längere Zeit brauchen, um zersetzt zu werden, oder aber nur erzeugt, in Schwingung gebracht und gar nicht zersetzt werden, werden in größerer Menge oder aber unvermindert übrig bleiben. Die im Dunkeln abklingende Farbe wird sich daher qualitativ ändern; die Molecüle der Sehstoffe kommen in bestimmter Folge zur Ruhe. Folgt aber auf die erste Beleuchtung eine zweite andersgeartete, dann ist die Netzhautstelle für die zweite Beleuchtung mit Sehstoffmolecülen in einem bestimmten Mischungsverhältnisse imprägniert. Die vorübergehend aufgespeicherten Molecüle kommen nicht zur Ruhe, ihre Schwingungen werden intensiver und die Molecüle selbst werden der Zersetzung entgegengeführt. Dadurch gibt die zweite Beleuchtung infolge der Cooperation mit der Nachwirkung der vorangegangenen Beleuchtung das Resultat des complementären Nachbildes in zweiter Beleuchtung. Das complementäre Nachbild in diesem Sinne, also mit principiellem Ausschlusse des Abklingens, könnte man daher auch die successive Cooperation verschiedenfarbigen Lichtes nennen.

Im gelben Lichte z. B. wird mehr Blaustoff als Gelbstoff aufgespeichert. Es wird mehr Blaustoff in diesem Lichte erzeugt werden, als in demselben Lichte zersetzt werden kann, während das jeweilig vorhandene, allerdings wegen der lebhaften Schwingung äußerst wirksame Quantum von Gelbstoff

bei plötzlicher Unterbrechung der gelben Beleuchtung einen nur sehr kleinen Rest unzersetzter Molecüle übrig lassen wird, selbst wenn das Quantum der schwingenden Molecüle sehr groß gewesen sein sollte, weil die meisten Molecüle ihrer Zersetzung rasch entgegengeeilt waren, und bei Abbruch der Beleuchtung gar nicht mehr da sind. Im blauen Lichte hingegen wird mehr Gelbstoff erzeugt, als in demselben Lichte zersetzt werden kann; das Quantum des nach Abbruch der blauen Beleuchtung übrig bleibenden Blaustoffes dürfte sehr klein sein. Im gelben Lichte könnte eine noch größere Menge von Gelbstoff in Schwingung gebracht und zersetzt werden, wenn nur dieser in genügender Geschwindigkeit nacherzeugt werden könnte; im blauen Lichte könnte eine noch größere Menge von Blaustoff in Schwingung gebracht und zersetzt werden. wenn nur dieser Stoff in diesem Lichte mit genügender Geschwindigkeit nacherzeugt werden könnte. Trifft nun blaues Licht auf eine Netzhautstelle, die vorher mit gelbem Lichte beleuchtet war. und daher einen Vorrath von Blaustoffmolecülen mit einem kleineren Vorrath von Purpurstoffmolecülen enthält, so wird nun im blauen Lichte das Blaublättchen bedeutend stärker erregt werden, als es ohne die vorangegangene gelbe Beleuchtung der Fall wäre. Das blaue Licht findet nämlich Blaustoffmolecüle bereits fertig vor, und vermehrt die Zahl dieser Molecüle durch die eigene normale Erzeugung. Es ist damit ein Verhältnis geschaffen, als ob die Fähigkeit des blauen Lichtes. Blaustoff zu erzeugen, durch die vorausgegangene gelbe Beleuchtung verstärkt worden wäre. Es wird daher in der nachfolgenden kurzwelligen Beleuchtung das Blau gesättigter gesehen werden. Eine sonst weiße Fläche wird aus denselben Ursachen durch vorausgegangene farbige Beleuchtung der zum Sehen verwendeten Netzhautstelle in der complementären Farbe der früheren Beleuchtung erscheinen.

Dieselben Verhältnisse werden selbstverständlich auch dann bestehen, wenn nicht eine identische, in einem Punkte fixirte Fläche abwechselnd verschieden beleuchtet wird, sondern wenn der Fixationspunkt, der längere Zeit innerhalb

einer bestimmt gefärbten Fläche geruht hat, in eine angrenzende andersgefärbte Fläche geschoben wird. Fixiert man einen x-farbigen kleinen Kreis auf complementärfarbigem Grunde, und verschiebt man hernach den Fixationspunkt in den complementärfarbigen Grund, so wandert ein in der Farbe des Grundes tiefer gesättigtes Bild des Kreises über den Grund in die neue Ruhelage. Dies ist noch immer unzweifelhaft eine Cooperation der Nachwirkung einer Beleuchtung mit einer anderen nachfolgenden Beleuchtung selbst oder sogenannter successiver Farbencontrast.

Nun nehme man aber diesen kleinen Kreis sehr klein; man bedecke diese kleine Figur auf andersfarbigem Grunde mit einer oder mehreren Lagen weißen Seidenpapiers, so dass man dem Auge die Fixierung eines bestimmten Punktes erschwert. Die kleine Figur erscheint bekanntlich in der Farbe entsprechend verändert, beziehungsweise gefärbt, wenn sie weiß, grau oder schwarz und der Grund farbig ist. Dieser sogenannt simultane Farbencontrast ist ein successiver. Bei der Kleinheit der Figur und der Erschwerung der Fixation wird es nicht ausbleiben, dass diese Figur auf einer Netzhautstelle abgebildet wird, welche kurz vorher durch ein farbiges Licht mit Sehstoffen imprägniert worden ist. Infolge dessen erscheint die Farbe der kleinen Figur durch complementärfarbige Umgebung gesättigter, und wenn die Figur weiß bis schwarz ist, eine complementäre Färbung, und überhaupt die Farbe dieser Figur durch jede Art Färbung der Umgebung im Sinne der Aufspeicherung von Sehstoffen entsprechend beeinflusst. Erleichtert man die Fixation durch Contourierung der kleinen Figur auf dem bedeckenden Seidenpapier, oder auch durch Anbringung eines einzigen schwarzen Punktes, so verschwindet bekanntlich die Erscheinung des nur sogenannt simultanen Farbencontrastes. Es stellt sich jedoch bei genauer Fixation der kleinen Figur und bei genauer Accomodation eine andere Erscheinung ein, nämlich das Phaenomen des Mitklingens im Innern der Fläche der kleinen Figur.

Die Cooperation verschiedenfarbiger Beleuchtung spielt eine wichtige Rolle bei der Lichtmischung; diese Mischung mag nun in Rotationsapparaten vorgenommen werden oder durch Deckung ruhender Lichtstreifen entstehen.

Um die Bedeutung der Sehstoffaufspeicheruug für die Lichtmischungen zu illustrieren, mache ich folgendes Experiment: Ein um eine verticale Axe rotierender Cylinder ist mit schwarzem Papiere überzogen. Der Durchmesser der Basis des Cylinders ist 30 *cm.* Auf dem Cylindermantel sind in gleichen Abständen von einander 6 senkrecht gestellte Streifen von rein gelbem Papier ohne Spur eines grünen Tones angebracht. Diese Streifen haben in horizontaler Breite 2 *cm.* Bei rascher Rotation gibt der Cylinder den Eindruck eines reinen und in Rücksicht auf die große Schwarzfläche eher hellen als helldunkeln Olivgrün. Dies erklärt sich leicht daraus, dass sich das blaue Nachbild der gelben Streifen auf dem schwarzen Grunde mit dem von den gelben Streifen reflectierten gelben Lichte zu Grün mischt, während die große Verminderung der Helligkeit durch schwarze Flächen aus dem harten Grün das weiche Olivgrün macht. Gibt man einen gleiches mit gelben Streifen versehenes Band schwarzen Papieres in ein Stroboskop, so sieht man bei geeignet langsamer Rotation die schwarzen Felder indigoblau. Von dem schwarzen Papiere wird eben noch hinreichend viel Licht reflectiert, um das blaue Nachbild erzeugen zu können.

Die Mischung von Gelb und Schwarz zu Grün erfolgte immer im diffusen Tageslichte. Nehme ich statt der schwarzen Felder ebenso große graue, so entsteht kein Grün, wohl aber eine auffallende Helligkeit des resultierenden schwachgelb getönten Grau. Lasse ich auf das rotierende Gelb-Schwarz directes ungedämpfes Sonnenlicht fallen, so erhalte ich einen gewissermaßen chocoladebraunen Ton. In beiden Modificationen des Versuches wird die Intensität des Lichtes erhöht; in dem einen Falle durch die Erhöhung der Intensität der äußeren Lichtquelle, in dem anderen durch die von den grauen Feldern reflectierte größere Menge diffusen Lichtes. Die complementäre Nebenwirkung bleibt hier wie es scheint

bei steigender Lichtintensität hinter der primären Wirkung zurück. Es scheint zwar mehr Blaustoff gebildet, aber weniger von demselben aufgespeichert zu werden, weil die erhöhte Intensität mehr zu ersetzen vermag.

Viel kräftiger wird das blaue Nachbild entstehen, wenn nicht Gelb und Schwarz, sondern Gelb und Indigoblau aufeinander folgen. Die Wirkung der Mischung wird aber hier nicht so auffallend sein wie im Falle Gelb-Schwarz. Das Nachbild von Gelb ist nämlich indigblau, und das Nachbild von Indigo ist gelb. Es kann also keine auffallend neue Farbenmischung hervorgehen. Pigmentgelb und Pigmentindigo wird sich eben in geeigneten Verhältnissen zu hellem Grau mischen. Was sich aber sehr geltend macht, das ist die Vermehrung der Helligkeit. Zu dem aus Gelb und Indigo direct gemischten Weiß tritt das aus den Nachbildern gemischte Weiß hinzu. Es ist daher gar nicht gleichgiltig, ob man zur Farbenmischung Componenten mit kräftigen oder mit verschwindend schwachen Nachbilden wählt. Im ersteren Falle ist der Zuwachs an Helligkeit durch Mischung der Nachbilder bedeutend, im letzteren Falle fast null. Bei verschiedenen Lichtintensitäten (Tageslicht), in denen ich mit dem rotierenden schwarzen Cylinder und gelben Streifen reines Olivgrün erhielt, ist es mir nicht gelungen, bei denselben Dimensionen der Streifen Roth auf Schwarz, Grün auf Schwarz, Blau auf Schwarz Verschiebungen des Farbentones aus der Farbengruppe hinaus erzielen. Es ist daher unzulässig, aus Rotationsmischungen auf specifische Helligkeiten der componierenden Farben zu schließen.

Mische ich Licht nicht erst auf der Netzhaut durch rotierende Scheiben, sondern auf ruhenden zur Congruenz gebrachten Flächen, so werde ich ähnliche Verhältnisse erhalten, wie bei der Mischung durch Rotation. Das gelbe Licht arbeitet dann durch Aufbau neuer Sehstoffmolecüle nicht bloß für den eigenen Verbrauch, sondern auch für den Verbrauch des am selben Platze wirkenden blauen Lichtes; das blaue Licht verhält sich analog.

Diese auf Bildung von Sehstoffen beruhende Wirkung eines Lichtes auf die Wirkung eines anderen, das diese Sehstoffe zersetzt, nenne ich die complementäre Nebenwirkung des ersteren.

Die complementäre Nebenwirkung ist zwischen allen Lichtarten wechselseitig. Sie findet nicht bloß zwischen complementären Lichtarten statt. Mischt man rothes Licht mit gelbem, so mischt man auch die complementäre Nebenwirkung des ersteren (Blaugrün) mit derjenigen der letzteren (Indigo). Indigo mischt sich mit Gelb zu Weiß und Blaugrün mit Roth ebenfalls, so dass daraus eine Aufhellung der Mischfarbe folgt.

Diese Aufhellung kann ganz unbedeutend sein, wenn die complementären Nebenwirkungen selbst schwach sind. Am stärksten wird sie sich in den Mischungen mit gelbem Lichte geltend machen, weil das Gelb die stärkste Nebenwirkung hat. Daher kommt die sonst räthselhafte Erscheinung, dass das an Grün grenzende Gelb mit dem an Blaugrün grenzenden Cyanblau ein sehr weißliches Grün gibt, statt Grün spectraler Sättigung. Die complementäre Nebenwirkung von Gelb ist Indigo und stark, die complementäre Nebenwirkung von Cyanblau ist Orange und bedeutend schwächer. Es bleibt also in der Mischung der complementären Nebenwirkungen ein Übergewicht von Indigo; die complementäre Nebenwirkung von Blau kommt dem gegenüber fast gar nicht in Betracht. Mithin ist der Fall so, als ob Gelb nicht mit Cyanblau gemischt würde, sondern mit einer Mischung von Cyanblau und Indigo. Weil aber Gelb mit Indigo Weiß gibt, so liegt auch das Mischungsresultat zwischen Grün und Weiß.

Bei Lichtmischungen werden die complementären Nebenwirkungen nicht bloß die Helligkeit, sondern auch den Farbenton beeinflussen können, weil sie ja nicht ohne Rest zu farblosem Lichte beziehungsweise zu Weiß zusammentreten müssen. Das rotierende Gelb auf Schwarz beweist, dass eine Farbe sich selbst mit ihrer eigenen complementäre Nebenwirkung zu einer anderen Farbe mischen kann.

Man sollte glauben, dass man ein Ordinatensystem, in welchem die Curven der Grundfarben hypothetisch eingetragen sind, durch davon abgeleitete Gleichungen für Farbenmischungen und complementäre Verhältnisse prüfen könnte, oder aber umgekehrt aus Farbenmischungsgleichungen die Curven voraussetzungslos rechnen könnte. Die complementäre Nebenwirkung der Lichter spielt jedoch bei deren Mischung eine außerordentlich störende Rolle.

Mischt man zweierlei Licht, das im Spectrum sehr nahe gelegene Stellen hat, so wird das Mischungsergebnis nach Farbenton, Helligkeit und Intensität das arithmetische Mittel der Componenten sein. Die complementären Nebenwirkungen können sich für die Empfindung nicht geltend machen. Zwei wenig verschiedene Grüntöne werden wenig verschiedene complementäre Nebenwirkungen haben. Der von dem einen Lichte aufgespeicherte Purpurstoff wird von dem anderen Lichte nicht erheblich anders beeinflusst werden, als von dem ersteren. Je weiter hingegen die zu mischenden Lichter im Spectrum dem complementären Verhältnisse entgegenrücken, desto leichter wird der in dem einen Lichte erzeugte und aufgespeicherte Sehstoff in dem anderen Lichte in Schwingung und Zersetzung kommen und umgekehrt. Die beiden Lichter werden infolge der Mischung so zusammenarbeiten, als ob die Fähigkeit eines jeden der Lichter, Sehstoffe zu erzeugen, erhöht worden wäre. Wenn man daher aus Farbengleichungen Grundfarbencurven oder auch nur Elementarempfindungscurven [1]) rechnet, so hat man die complementäre Nebenwirkung immer als Unbekannte und die Gleichung unrichtig machende Größe darin. Insbesondere dürften die Blaucurven wegen der großen complementären Nebenwirkung des gelben Lichtes durchgängig zu groß ausfallen. Sind zwei Streifen des Spectrums, die complementäre Nebenwirkung weggedacht, geradezu complementär, so können auch die

[1]) Über den Unterschied von Elementarempfindung und Grundempfindung: A. König und C. Dieterici: „Die Grundempfindungen in normalen und anomalen Farbensystemen und ihre Intensitätsvertheilung im Spectrum.“ Zeitschr. f Psych. IV. Bd. S. 241 ff.

beiden complementären Nebenwirkungen der Lichter untereinander complementär sein. Das complementäre Verhältnis wird in diesem a priori nicht sehr wahrscheinlichen Falle nicht gestört. Hat man zwei verschiedene Paare von Pigmentfarben, welche sich durch Rotation zu Grau mischen, so hat man in den Helligkeiten der Mischungsresultate zum großen Theile das Ergebnis der complementären Nebenwirkungen. Man kann sich hier durch Schlüsse auf specifische Helligkeiten der componenten Farben wegen der Nichtbeachtung der complementären Nebenwirkung wesentlich irren.

Aus der Berücksichtigung der complementären Nebenwirkung folgt auch, dass bei der Darstellung der Farben- und Intensitätsvertheilung im Spectrum durch ein Ordinatensystem die von der Purpur-, Gelb- und Blaucurve einerseits und von der Abscisse andrerseits eingeschlossenen drei Flächen durchaus nicht gleich groß sein müssen, wenn das in sich gemischte Spectrum sich zu rein farblosem Lichte concentrieren lassen soll. Die im Raume zusammengedrängten Lichter wirken infolge ihrer Cooperation ganz anders, als wenn sie isoliert sind. In der Exemplification (Tafel Seite 50) sind diese drei Flächen absichtlich gleich groß gemacht worden, um zu zeigen, dass diese Gleichheit erreichbar ist. Diese Gleichheit gilt aber nur unter der Voraussetzung, dass auch die complementäre Nebenwirkung des ganzen Spectrums sich zu farblosem Lichte mische. Sollte dies nicht der Fall sein, dann wird die Farbe der vereinigten complementären Nebenwirkungen zur Farbe des concentrierten Spectrums ohne diese Nebenwirkungen complementär sein. Die Purpur-, die Gelb- und die Blaucurve werden dann einen anderen Lauf nehmen und die von ihnen und der Abscisse eingeschlossenen drei Flächen werden ungleich groß sein.

V.

Anwendung der Hypothese auf totale Farbenblindheit.

Der Begriff der totalen Farbenblindheit umfasst in negativer Weise alle jene Fälle des Sehvermögens, in welchen die Fähigkeit des Farbensehens gänzlich mangelt. Positiv betrachtet können diese Fälle zu zwei einander ausschließenden Extremen gehören, die untereinander weiter entfernt sind, als jedes dieser Extreme von der Normalsichtigkeit.

Denkt man die Secretion des Bildungsmateriales für die Sehstoffe aufgehoben und mithin diese selbst gänzlich weg, so wird nur die directe Erregung der vier Sehblättchen durch das Licht übrig bleiben. Diese directe Einwirkung ist nach der Hypothese innerhalb jeder einzelnen Wellenlänge für alle vier Sehblättchen gleich groß, und für verschiedene Wellenlängen veränderlich. Es wird also die Verstärkung der Erregung durch die Sehstoffe entfallen, und die Curven aller Sehblättchen werden mit derjenigen des anonymen Sehblättchens (Tafel Seite 50) congruent werden. Diesem Erregungszustande ist nach der Hypothese die Empfindung des farblosen Lichtes zugeordnet. Das Spectrum wird, wie die Ordinatentafel zeigt, an beiden Enden beträchtlich verkürzt sein; das Helligkeitsmaximum findet sich in der Nähe von E in Grün: dem Spectrum fehlt jede Farbe. Die Fähigkeit Weiß zu sehen, welche das Zusammenwirken der drei Sehstoffe voraussetzt, entfällt gleichfalls. Die Empfindung ist beschränkt auf die Mannigfaltigkeit zwischen glanzlosem Schwarz und farblosem Lichte, zwischen welchen Extremen das glänzende Schwarz und das glänzende Grau (Silberglanz) liegt. Diese Constitution möchte ich die Schwarz-Glanzsichtigkeit, oder kurzweg Glanzsichtigkeit, Lamproblepsie, nennen. Ich glaube, dass z. B. Dr. A. Beyssell [1]) lamprobleptisch war.

Nun denke man sich das andere Extrem. Die Secretion von Bildungsmaterial für die Sehstoffe sei überaus reichlich;

[1]) A. König und C. Dieterici: „Die Grundempfindungen in normalen und anomalen Farbensystemen und ihre Intensitätsvertheilung im Spectrum.“ Zeitschrift f. Psychologie. IV. Bd. Seite 253 ff.

die Sehstoffe seien infolge dessen nicht bloß an der Peripherie sondern auch im Centrum der Netzhaut aus concentrierter Lösung durch das Licht erzeugbar. Die Verstärkung der Erregung der Sehblättchen durch die Sehstoffe wird außergewöhnlich groß sein. Nun hat nach dieser Hypothese jedes Sehblättchen eine Structur, durch welche ein Maximum der Erregbarkeit vorgezeichnet ist. Dieses Maximum der Erregbarkeit kann nur durch irreparable Zerstörung des Sehblättchens überschritten werden. Diese Maximen der Erregbarkeit der Sehblättchen seien untereinander gleich. Sind nun drei ungleich starke Erregungen von absolut nicht allzu großer Stärke gegeben, so wird der Erregungsunterschied der Sehblättchen als Farbe empfunden. Sind aber die ungleich starken Erregungen absolut genommen sehr groß, so kann es vorkommen, dass die relativ schwächste Erregung, absolut genommen, noch immer stark genug ist, um das zugehörige Sehblättchen in das Maximum der structurell möglichen Erregung zu bringen. Für die beiden anderen Sehblättchen, welche über das Maximum der Erregbarkeit nicht hinausgebracht werden können, geht der Überschuss der noch stärkeren Erregung, was die Empfindungszuordnung betrifft, verloren. Es wird von da ab immer nur Weiß empfunden werden können. Sind also die Sehstoffe infolge des reichlich ausgeschiedenen Bildungsmateriales überall, auch im Centrum der Netzhaut, in einer gewissen großen Menge erzeugbar, so wird jede Farbe in Weiß übergehen. Dies wird umso leichter der Fall sein, je intensiver die Beleuchtung ist. Die Empfindung verfügt über eine Mannigfaltigkeit, welche zwischen den drei Extremen: glanzloses Schwarz, glanzloses Weiß und farbloses Licht ausgespannt ist. Zwichen diesen Extremen findet sich glanzloses Grau, glänzendes Grau, (Silberglanz), glänzendes Schwarz und glänzendes Weiß. Diese Constitution möchte ich die Schwarz-Weiß-Glanzsichtigkeit. oder kurzweg nach dem auszeichnenden Bestandtheile die Weißsichtigkeit oder L e u k o b l e p s i e nennen.

Leukobleptisch ist auch normaler Weise die Peripherie der Netzhaut. Das Vorkommen von Sehpurpur in der Peri-

pherie weist darauf hin, dass dieser leukobleptische Zustand mit Überfülle von Sehstoffen zusammenhängen dürfte. Damit scheint auch zusammenzuhängen, dass die Größe der beleuchteten Fläche für die Entfärbung maßgebend ist. In einer Netzhautregion, in der ein kleines farbiges Object schon weiß gesehen wird, lässt sich bei einem größeren Objecte noch Farbe erkennen. [1]) Das Bildungsmaterial kann sich im ersteren Falle aus der beschatteten Umgebung her auf die kleine beleuchtete Fläche concentrieren.

Eine abnorme Herabsetzung der Elasticität der Sehblättchen wird bei mittelheller Beleuchtung und normaler Secretion von Bildungsmaterial gleichfalls Leukoblepsie herbeiführen können. Das Maximum der Erregbarkeit der Sehblättchen wird eben dann leichter erreicht. Auf diese Weise erkläre ich mir das Vorkommen von kleinen leukobleptischen Stellen der Netzhaut, welche örtlich umschrieben und fixirt sind.

Umfasst die Leukoblepsie abnormer Weise die ganze Netzhaut, so sind nach meiner Auffassung nicht die Sehblättchen abnorm (wenigstens müssen sie es nicht sein) und auch nicht die Sehstoffe. Die eigentliche Ursache sei die abnorm reichliche Secretion des Bildungsmateriales für die Sehstoffe. Das Sehvermögen als solches ist nicht verändert. Es liegt daher keine Veranlassung vor, eine Verkürzung des Spectrums a priori zu vermuthen, es müsste denn das reichlich vorhandene Bildungsmaterial einen Theil des Lichtes auf dem Wege noch vor der Entwicklung des dem Sehenden dienenden Bildpunktes absorbieren, wodurch allerdings eine Verkürzung des Spectrums entstehen kann. Eine zu große Menge von absorbierenden Stoffen wird die Ausübung des Sehvermögens sehr erschweren können. Ist das Licht nur wenig wirksam, wie z. B. in Braun, dann wird trotz der großen Menge von Sehstoffmolecülen ein normales oder nahezu normales Braunsehen möglich sein. Ich rechne hierher einen von Becker [2]) veröffentlichten Fall von monocularer, totaler Farbenblindheit,

[1]) Snellen und Landolt, in Graefe und Saemisch' Handb. d. Augenheilk. III, 1, S. 69. Charpentier Compt. rend. XCVI, p. 858.

[2]) Arch. f. Ophthalm. XXV, II Abth. 1879. S. 205.

über welchen Hering[1]) mit folgenden Worten referiert: „Das linke farbenblinde Auge sah mit einer einzigen sogleich zu erwähnenden Ausnahme Alles farblos und verwechselte somit alle Farben; das rechte hatte normalen Farbensinn. Am rothen Ende reichte das Spectrum für das farbenblinde und für das gesunde Auge der Patientin soweit wie für irgend ein farbentüchtiges Auge, am anderen Ende schien das Spectrum für das farbenblinde Auge ein klein wenig verkürzt zu sein. Die größte Helligkeit lag für das rechte gesunde Auge etwas rechts von der Natriumlinie, für das linke fast genau in der Natriumlinie. Dass das Auge übrigens nicht absolut farbenblind war, geht daraus hervor, dass demselben Braun als farbig, d. h. als Braun erschien. Ein Missverständnis hierüber wird dadurch ausgeschlossen, dass das andere Auge einen vollkommenen Farbensinn hatte, und die Patientin also wusste, was unter Braun zu verstehen sei."

Leukoblepsie und Lamproblepsie werden sich auch durch die verschiedene Lage der größten Helligkeit im Spectrum von einander unterscheiden. Im Falle der Leukoblepsie wird das Helligkeitsmaximum nahezu in die D-Linie geschoben, im Falle der Lamproblepsie in die Nähe von E.

VI.

Anwendung der Hypothese auf partielle Farbenblindheit.

Ein mittelhelles Spectrum erhält bekanntlich durch Steigerung der Lichtintensität die Tendenz, sich auf die Farben Gelb und Blau zu beschränken, wobei diese Farben auf die Stellen der anderen hinübergreifen und gleichzeitig weißlich werden.

Wird ein Spectrum mittlerer Helligkeit allmählich verdunkelt, so verbreitet sich bekanntlich zunächst Roth, Grün

[1]) Zur Erklärung der Farbenblindheit, Sonderabdruck 1880 Seite 16

und Violett auf Kosten von Orange, Gelb, Gelbgrün, Blaugrün und Blau, bis Roth, Grün und Blauviolett unmittelbar nebeneinander bleibt: dann geht Grün in Grau über; Roth leistet am längsten der Entfärbung Widerstand. [1])

Wenn nun das Farbensehen wirklich auf Vermittlung der Sehstoffe beruht, so wird ein ähnliches Resultat wie bei der Steigerung der Lichtintensität durch vermehrte Erzeugung von Sehstoffen ohne Steigerung der Lichtintensität bloß durch abnorm reichliche Secretion von Bildungsmaterial für die Sehstoffe herbeigeführt. Eine größere Zahl normal erregter Sehstoffmolecüle wird eine ähnliche, wenn nicht die gleiche Wirkung auf die Sehblättchen haben wie eine normale Zahl stärker erregter.

Je reichlicher sich die Secretion von Bildungsmaterial für alle drei Sehstoffe gestaltet, desto deutlicher wird das Spectrum die Tendenz annehmen, sich auf die Farben Gelb und Blau zu beschränken. Es wird ein Zustand eintreten, den man positiv die Gelb-Blausichtigkeit und negativ die Rothblindheit nennt. Diese partielle Farbenblindheit möchte ich die Farbenblindheit der hypertrophischen Richtung nennen. Dieselbe liegt naturgemäß als Übergang zwischen der Normalsichtigkeit und der Leukoblepsie. Durch Herabsetzung der Lichtintensität wird dieser Zustand im Sinne einer kleinen Annäherung an die Normalsichtigkeit verändert werden. Diese Constitution wird noch dadurch compliciert, dass die überreichliche Secretion von Bildungsmaterial Absorptionen des Lichtes im Auge zwischen der Eintrittsstelle und dem Bildpunkte zu bewirken vermag. Diese Verkürzung des Spectrums, welche sich durch Veränderung des Lichtes im Lichtwege erklären lässt, muss nicht nothwendiger Weise auf eine Veränderung im Sehvermögen als solchem bezogen werden.

Andrerseits wird durch eine abnorm spärliche Secretion von Bildungsmaterial für die Sehstoffe ein ähnliches Resultat herbeigeführt werden wie durch allmähliche Verdunkelung

---

[1]) W. v. Bezold, Poggend. Ann. Bd. 150. S. 237 (1873). Brücke, Sitzungsberichte d. Wiener Ak. d. W. Bd. 77. III. S. 39—71 (1878).

eines mittelhellen Spectrums bei Normalsichtigkeit. Eine kleine Anzahl lebhaft schwingender Molecüle wird ähnlich wirken wie eine größere Anzahl träge schwingender. Weil nun die Verdunklung des Spectrums bei Normalsichtigkeit Roth, Grün und Violett auf Kosten von Gelb und Blau begünstigt, so wird man vermuthen dürfen, dass auch die abnorm spärliche Secretion des Bildungsmateriales bei mittelheller Beleuchtung gleichfalls Roth, Grün und Violett auf Kosten von Gelb und Blau begünstigen wird, bis Roth und Grün unmittelbar nebeneinander stehen. Bei spärlicher Production von Sehstoffen kann das schwache spectrale Violett leicht ganz ausfallen. Diese Constitution, welche positiv als Roth-Grünsichtigkeit und negativ als Gelb-Blau-Blindheit, auch als Violettblindheit bezeichnet werden kann, möchte ich die partielle Farbenblindheit atrophischer Richtung nennen. Dieselbe ist das natürliche Mittelglied zwischen Normalsichtigkeit und Lamproblepsie.

Die beiden partiellen Farbenblindheiten sind nach dieser Hypothese Übergänge von der Normalsichtigkeit zu den beiden einander entgegengesetzten totalen Farbenblindheiten, die sich als Extreme berühren. Es handelt sich hierbei weder um abnorme Sehblättchen (Sehorgane) noch um abnorme Sehstoffe, sondern nur um Abnormitäten in der Secretion des Bildungsmateriales für die Sehstoffe. Weil die drei Sehstoffe und ihre Wirksamkeit auf die Sehblättchen unabhängig von einander angenommen werden, daher auch nicht antagonistische Verhältnisse zwischen chemischen Processen angenommen werden, so entfällt eine a priori gegebene Nöthigung, das gesammte Roth mit dem gesammten Grün und das gesammte Gelb mit dem gesammten Blau immer zugleich ausfallen zu lassen. Für die Hypothese ist es ganz gleichgiltig, ob bei der Rothgrünblindheit Reste von Grün erhalten bleiben oder nicht, wie groß diese Reste sind, und ob es sich um deutliches Grün handle oder nicht.

Das in sich gemischte und concentrierte Spectrum der partiellen Farbenblindheiten dürfte in den meisten Fällen farbloses Licht mit Weißgehalt geben. Aus den Daten der

Rothblindheit z. B. lässt sich nicht schließen, dass das Purpurblättchen und der Purpursehstoff fehlen. Man ist nur zur Annahme genöthigt, dass die Erregung des Purpurblättchens durch Purpurstoff an allen Punkten des Spectrums die relativ schwächste ist. Über die absolute Größe der Erregung ist damit nichts gesagt. Es kann daher weder Roth noch Violett zur Empfindung kommen. Nichtsdestoweniger dürfte Purpurstoff vorhanden und wirksam sein; die Purpurempfindung ist an der langwelligen Seite durch Gelb, an der kurzwelligen durch Blau gedeckt (die Verkürzung des Spectrums soll später erörtert werden); es ist daher sehr leicht möglich, dass bei dem in sich concentrierten Spectrum Purpur-, Gelb- und Blauerregung ins Gleichgewicht kommen. Es ist aber auch möglich, dass die Purpurerregung auch im gemischten Lichte relativ schwächer ist, wobei das in sich gemischte Spectrum weißlich Grün, weißlich Gelb oder weißlich Blau ergäbe. Ist aber das Material für Sehstoffe reichlich vorhanden, und dadurch eine reichliche Erzeugung von Sehstoffen ermöglicht, dann wird für das in sich gemischte Spectrum das Auge leukobleptisch; auch die relativ geringere Menge von Purpurstoff ist absolut so groß, dass auch das Purpurblättchen im gemischten Lichte in das Maximum der Erregung kommt. Das Mengenverhältnis der Sehstoffe wird dann für die Empfindung gleichgiltig.

Die partielle Farbenblindheit hypertrophischer Richtung entspricht im großen und ganzen der Rothgrünblindheit im Hering'schen Sinne; die partielle Farbenblindheit in atrophischer Richtung im großen und ganzen der Gelbblaublindheit im Hering'schen Sinne. Eine dritte Richtung ist ausgeschlossen. Weil aber nicht nur viele Grade der Hypertrophie und Atrophie denkbar, sondern auch bei drei Sehstoffen viele Combinationen innerhalb der Hypertrophie und innerhalb der Atrophie, so lässt die hier entwickelte Hypothese viele verschiedene Wege von der Normalsichtigkeit zur totalen Farbenblindheit construieren.

So unterscheidet man die Rothblindheit, in welcher Hellroth mit Dunkelgrün verwechselt wird, und das Spectrum

meistens verkürzt erscheint, von der Grünblindheit, in welcher Dunkelroth von Hellgrün schwer unterschieden wird, und im Spectrum ein mittlerer, zwischen Gelb und Blau gelegener Theil mit Grau verwechselt wird, außerdem alle Übergangsstufen zur Normalsichtigkeit vorzukommen scheinen. Würde sich die abnorm reichliche Erzeugung von Bildungsmaterial für die Sehstoffe immer auf alle drei Sehstoffe gleichmäßig vertheilen, so könnte man in der Hypothese nur einen einzigen geradlinigen Weg von der Normalsichtigkeit zur Leukoblepsie construieren, und auf diesem Wege läge die Rothgrünblindheit schlechthin. Eine Unterscheidung in Rothblindheit und Grünblindheit wäre nicht gut denkbar. Nun kann aber die abnorm reichliche Secretion des Bildungsmateriales hier den einen dort den anderen Sehstoff bevorzugen.

Es seien z. B. alle drei Arten von Bildungsmaterial abnorm reichlich vorhanden, eine dieser Arten jedoch relativ noch reichlicher. Die concentriert entstehenden Sehstofflösungen mögen analog der intensiven Beleuchtung eines normal sehenden Auges dem Spectrum die Fähigkeit verleihen, sich auf Gelb und Blau zu beschränken. Das relativ am reichlichsten erzeugte Bildungsmaterial wird aber außerdem im Stande sein, bloß weil es so reichlich vorhanden ist, das Licht in der Zeit zwischen dem Eintritte in das Auge und der Entwicklung des letzten dem Sehen dienenden Bildpunktes auf dem Lichtwege selbst durch Absorption so zu verändern, dass eine Verkürzung des Spectrums entsteht. Diese Verkürzung des Spectrums, insbesondere die Verdunklung des spectralen Roth, muss nicht auf eine Schwächung des Sehvermögens als solchem bezogen werden. Das Ergebnis wäre Gelb und Blau im Spectrum, getrennt durch eine farblose Linie und mehr oder weniger an den Enden verdunkeltes Spectrum. Das wäre die typische Rothgrünblindheit mit verkürztem Spectrum.

Durch das Vorkommen anderer Substanzen im Auge, welche mit der Bildung von Sehstoffen nichts zu thun haben, können gleichfalls Absorptionen des Lichtes verursacht werden, welche sich durch Absorptionsstreifen im Spectrum

bemerkbar machen werden, und das richtige (normale) Farbensehen aufheben.

Nun muss man aber nicht nothwendig annehmen, dass eines der Bildungsmaterialien so reichlich erzeugt werde, dass eine Verkürzung des Spectrums eintritt. Diese Verkürzung gehört also nicht zum Wesen der typischen Rothgrünblindheit. Für den Begriff der letzteren genügt es, dass Roth nicht als Roth gesehen wird. „Rothgrünblinde, denen das Spectrum nicht verkürzt erscheint, sehen wahrscheinlich statt des Spectralroth ein Gelb von größerer Sättigung als wir es jemals sehen können. Denn für uns ist das tonreine Spectralgelb stark mit Weiß vermischt, und schon im Orange erscheint uns das Gelb mit Roth versetzt, welches dann das Gelb mehr und mehr übertönt.“ [1]) Es ist allerdings auch möglich, dass solche Farbenblinde das Roth nicht so sehr wie gesättigt als vielmehr wie dunkleres, nach Gelbbraun neigendes Gelb sehen, entsprechend der unvollständigen Verdunklung des Spectrums.

Nun nehme man an, die abnorm reichliche Secretion von Bildungsmaterial betreffe zunächst nur einen Sehstoff, den Purpurstoff und dieses Material sei nicht dasjenige, welches im soeben besprochenen Falle der eigentlichen Rothblindheit die Verkürzung des Spectrums bewirkte. Das nun in Betracht kommende Material verändere das Licht auf dem Lichtwege durch Absorption in dem anderen Sinne, dass ein Theil des grünen Lichtes gedämpft wird. Analog der Wirkung sehr schwacher Beleuchtung des normal sehenden Auges wird dieses Grün grau gesehen werden. Das unzerlegte Sonnenlicht wird wegen der Schwächung dieses Antheiles und der reichlichen Erzeugung von Purpurstoff röthlich bis rosa (Purpur + farbloses Licht) erscheinen. Der Helligkeitsgrad wird zum Rosagehalt. Von Hellgrün wird die Farbe Grün entfallen oder aber gedeckt werden, die Helligkeit erscheint als Rosagehalt und die Lichtschwächung rückt den gesammten Eindruck nach Dunkelpurpur bis Dunkelroth. Die Verwechslung eines bestimmten

---

[1]) Hering, Zur Erklärung der Farbenblindheit, Sonderabdruck 1880, Seite 26.

Hellgrün mit einem bestimmten Dunkelroth wird dadurch sehr erleichtert. Dies sei der schematisierte Fall einer extremen Grünblindheit, bei welcher das Spectrum unverkürzt und Roth erhalten bleibt.

Denkt man sich nun die Secretion der Bildungsmaterialien für die beiden anderen Sehstoffe gleichfalls abnorm gefördert, jedoch nicht in dem Grade, dass eine dieser Substanzen oder beide zusammen durch Lichtabsorption eine Verkürzung des Spectrums bewirken, so wird das Spectrum die Tendenz erhalten, sich auf Gelb und Blau zu beschränken. Den verschiedenen Graden der Hypertrophie entsprechend sind alle Übergangsstufen von der Normalsichtigkeit bis zum Rothgrünblindheitsstadium der Grünblindheit construierbar.

Denkt man sich die Secretion abnorm reichlich, auf alle Arten Bildungsmaterial gleichmäßig vertheilt, und zwar so reichlich, dass das Auge für alle Theile des Spectrums leukobleptisch wird, jedoch nicht so reichlich, dass Lichtabsorption eintritt, so entsteht die Form der Leukoblepsie mit unverkürztem Spectrum.

Mit Benützung der Combinationen, welche innerhalb der hypertrophischen Richtung liegen, lassen sich viele Unterarten der Rothgrünblindheit construieren, umso leichter also nur zwei Unterarten, die Rothblindheit im engeren Sinne, und die Grünblindheit.

In ähnlicher Weise gibt es in der atrophischen Richtung die Möglichkeit, Combinationen und Einseitigkeiten zu construieren, z. B. die Schwarzblausichtigkeit durch Reduction der Sehstoffe auf Blaustoff.

Die hier entwickelte Hypothese steht auch in Übereinstimmung mit der Thatsache, dass in der mittleren Zone der Netzhaut von den Farben sozusagen nur Gelb und Blau empfunden wird; oder genauer gesprochen, dass hier das Auge für Roth und Grün sehr schwachsichtig ist, dass diese Eindrücke intensivere Beleuchtung und größere farbige Flächen verlangen, und dass selbst diese Eindrücke auf den der Peripherie näher liegenden Stellen nur einen Augenblick an-

dauern, um alsbald wieder zu verschwinden.[1]) Nach der hier construierten Hypothese nimmt nämlich die Concentration des Bildungsmateriales für die Sehstoffe vom Centrum nach der Peripherie zu, um hier ihre größte Concentration zu erreichen, was mit dem Vorkommen von Sehpurpur leicht in Zusammenhang gebracht werden kann, man mag nun diesen als Bildungsmaterialien für Sehstoffe oder als ein Gemenge von aufgespeicherten Sehstoffen auffassen. In der mittleren Zone wird daher ein der Rothgrünblindheit ähnlicher Zustand herrschen. Eine concentriertere Lösung von Sehstoffen wird bei normaler Beleuchtung einen ähnlichen Erfolg geben, wie eine intensive Beleuchtung bei normaler Concentration im Centrum, nämlich die Tendenz des Spectrums, sich auf Gelb und Blau zu beschränken. Es werden daher die Farben Gelb und Blau bevorzugt werden, Roth, Grün und Violett zurücktreten. Die Abgrenzung dieser mittleren Zone ist aber insoferne nicht in starren Linien möglich, weil das Bildungsmaterial für die Sehstoffe beweglich ist. Nimmt man kleine farbige Flächen in Roth oder Grün, so wird aus der beschatteten Umgebung Bildungsmaterial herbeiströmen, analog dem Phänomen des Mitklingens, wodurch das Farbensehen in der hypertrophischen Richtung der Rothgrünblindheit beeinflusst wird. Bei größeren Flächen findet diese Concentration nicht so schnell statt. Ebenso ist eine intensivere Beleuchtung, welche die Sehstoffe einer rascheren Zersetzung zuführt, der Annäherung an die Normalsichtigkeit, mithin dem Roth- und Grünsehen, günstiger, ohne dass diese Eindrücke auf die Dauer festgehalten werden können.

Die Tendenz des Spectrums, sich bei abnorm hoher Intensität der Beleuchtung auf Gelb und Blau zu beschränken, und bei abnorm niedriger Intensität auf Roth, Grün und Violett, kann, ohne selbst einem Erklärungsversuche unterworfen zu werden, zur Erklärung der Rothgrünblindheit und der Gelbblaublindheit herangezogen werden. Eine abnorm reichliche Secretion bei normaler Beleuchtung wird eine ähn-

[1]) Aubert, Physiol. Optik in Gräfe-Sämisch Handb. d. Augenheilk. II, 2, S. 539 ff.

liche Wirkung haben wie eine normale Secretion bei abnormaler Beleuchtung. Dabei wird immer vorausgesetzt, dass die Concentration des Bildungsmateriales für die Sehstoffe, und mithin auch die im Lichte entstehenden Sehstofflösungen im normalsehenden Centrum sehr gering, daher einer Steigerung fähig ist, aber dennoch nicht allzu gering, so dass sie noch einer Abschwächung fähig ist, bevor Lamproblepsie eintritt. Der Steigerung der Concentration im Centrum entspricht die Rothgrünblindheit, der Verringerung im Centrum die Gelbblaublindheit.

Die Veränderlichkeit der Farben mit der Intensität der Beleuchtung, beziehungsweise mit der Concentration des Bildungsmateriales für Sehstoffe, wird leichter verständlich, wenn man die Complication von Factoren beachtet, von welchen die Erregungsform der Sehblättchen abhängt. In einer bestimmten Wellenlänge würde vielleicht eine weit größere Menge eines bestimmten Sehstoffes erzeugt werden, wenn das Bildungsmaterial concentrierter wäre oder mindestens rascher herbeiströmte. Das Licht als solches ist im Centrum der Netzhaut des normalsehenden Auges in dieser Beziehung nicht immer und wahrscheinlich niemals an der Grenze seiner Leistungsfähigkeit angelangt. Die Erhöhung der Lichtintensität ist nicht immer der Verstärkung der Erregung der Sehblättchen durch die Sehstoffe günstig. Die Schwingung der Sehstoffmolecüle wird zwar intensiver, aber die Schwingungszeit vor der photochemischen Zersetzung, mithin die Zeit der Wirksamkeit kürzer. Über die Bilanz lässt sich a priori nichts aussagen. Verschiedene Sehstoffe werden sich hier ungleich verhalten. Außerdem werden die unteren Entstehungsgrenzen und die unteren Zersetzungsgrenzen bei verschiedenen Sehstoffen in verschiedenen Höhen der Lichtintensität liegen. Der eine Sehstoff wird mehr durch intensive Schwingung als durch große Zahl seiner Molecüle wirken, der andere mehr durch große Zahl bei träger Schwingung; der eine mehr durch intensive Schwingung als durch lange Schwingungszeit, der andere mehr durch die lange Zeit der Wirksamkeit auf die Sehblättchen zwischen seiner Entstehung und

seiner Zersetzung, als durch die Intensität der Schwingung der einzelnen Molecüle.

Man könnte z. B. ganz gut annehmen, dass in Violett trotz der niedrigen Erregungscurven die Strecke der lebhaftesten photochemischen Action sei. Ich will diese Möglichkeit nur betrachten, um die Complication der einschlägigen Verhältnisse zu beleuchten. Die Wirkung eines Sehstoffes hängt nämlich nach dieser Hypothese nicht gewissermaßen von einem Explosionsstoffe im Augenblicke der Zersetzung ab, sondern von der lebhaften Eigenschwingung als dem Vorspiele der Zersetzung, und der Übertragung der Eigenschwingung auf die gleichgestimmten Sehblättchen durch Mitschwingung. Wenn nun ein Molecül so rasch zersetzt wird, dass es nur eine Schwingungsperiode vorher durchmacht, das Molecül eines anderen Sehstoffes aber deren hundert, so wird ein Molecül des letzteren Stoffes, der sich träge zersetzt, weit wirksamer sein, als etwa fünfzig oder sechzig der ersteren Art, denn diese haben nur in der großen Intensität der kurzen Eigenbewegung ein Gegengewicht gegen die kurze Dauer der Einwirkung. Nimmt man nun versuchsweise an, dass die photochemische Action ihr Maximum in Violett hat, so wird in dieser Annahme auch liegen, dass dort das gesammte Bildungsmaterial so schnell als es herbeiströmt, in Sehstoffe umgewandelt wird, und dass diese Sehstoffe mit großer Schnelligkeit und daher wenigstens in dieser Hinsicht mit geringer Wirkung auf die eigentlichen Sehorgane zersetzt werden. Alle Erregungscurven werden niedrig bleiben. Nur Gelbstoff wird aufgespeichert, weil die Schnelligkeit der Neubildung etwas größer ist als die Schnelligkeit der Zersetzung. Aber auch hier dürfte die Zahl der aufgespeicherten Molecüle außerordentlich klein sein, wenn man sie mit der Zahl derjenigen vergleicht, welche gebildet und zersetzt wurden. Man könnte schließlich auch annehmen, dass die photochemische Action in Ultraviolett noch intensiver sei, daher dort die Erregung der Sehblättchen durch Sehstoffe ganz aufhört. Die höhere Intensität in der Mitte des normal gesehenen Spectrums beruht wahrscheinlich nicht darauf, dass in dieser

Gegend die Maxima der photochemischen Actionen für die einzelnen Sehstoffe liegen; hier scheint sich vielmehr Dauer und Intensität der schwingenden Eigenbewegung vor der Zersetzung in günstigster Weise zu combinieren. Demnach würde Ultraroth nicht mehr gesehen werden, weil die photochemische Action zu schwach ist; Ultraviolett hingegen nicht, weil die photochemische Action zu stark ist.

VII.

Schluss.

Die hier entwickelte Hypothese sucht den photochemischen Charakter mit dem photophysikalischen zu combinieren, indem sie nicht nur photochemisch zersetzbare und erzeugbare Sehstoffe annimmt, sondern auch direct durch das Licht photophysikalisch erregbare Sehblättchen, deren Erregung durch die Sehstoffmolecüle nur verstärkt, aber nicht erst ermöglicht wird.

Auf der ungleichen Verstärkung der Erregung von Sehblättchen, den eigentlichen Sehorganen, beruhe das Farbensehen, auf der gleichen Verstärkung das Weißsehen, und auf der directen Einwirkung des Lichtes ohne Mitwirkung der Sehstoffe die Empfindung des farblosen Lichtes.

Es wurden vier Sehblättchen angenommen, ein Purpur-, ein Gelb- und ein Blaublättchen, an welche sich noch ein anonymes Blättchen anschloß. Diesen Blättchen entsprechen ebenso viele Grundfarben. Jede Farbe, welche in die Empfindung gebracht werden kann, ist mit jeder anderen Farbe verglichen ganz gleich einfach. In der Empfindung gibt es keinen Unterschied zwischen einfachen Farben und Mischfarben; es gibt nur extreme Elemente in der Farbenempfindungsmannigfaltigkeit. Manche Extreme, wie Roth und Grün, können nicht miteinander verbunden werden, ohne dass eine Zwischenfarbe, diese sei nun Weiß oder Gelb, durchlaufen wird; Weiß ist ebenso einfach für die Empfindung, wie irgend

eine Farbe; Grau ist so einfach wie Schwarz oder Weiß. Hingegen ist die physiologische Empfindungszuordnung nach den Annahmen dieser Hypothese niemals einfach, sondern immer compliciert aus den Erregungsformen von vier Sehblättchen. Weil aber alle hierher gehörigen Empfindungen ganz gleich einfach erscheinen, so wurde auch angenommen, dass alle physiologischen Zuordnungen, alle Erregungsformen, ganz gleich compliciert und ganz gleich einheitlich gebaut seien. Soll mit dem Ausdruck Mischfarbe gesagt sein, dass die Empfindungszuordnung zu einer Farbe aus mehreren Erregungsformen einer morphologischen Einheit zusammengesetzt sei, dann halte ich alle Farben für Mischfarben, ohne irgend eine Ausnahme.

Der Ausdruck Grundfarbe bezieht sich nicht auf eine empfindbare Farbe, sondern auf eine hypothetische Empfindung, welche Empfindungsthatsache werden könnte, wenn die morphologische Grundlage auf ein einziges Sehblättchen reduciert würde.

Die Verstärkung der Erregung der Sehblättchen erfolgt durch die Sehstoffe. Dem Purpur-, dem Gelb- und dem Blaublättchen entspreche ein Purpur-, ein Gelb- und ein Blausehstoff. Dem vierten, dem anonymen Sehblättchen, entspreche kein Sehstoff. Hier fehlt eine Farbe, für deren Consequenzen das menschliche Auge farbenblind sei. Dieses Blättchen ermögliche durch sein Zusammenwirken mit den drei anderen die Empfindung des farblosen Lichtes.

Ein specifischer Sehstoff für Schwarz wurde nicht angenommen; wohl aber eine specifische einheitliche Erregungsform der vier Sehblättchen, welche bei Abwesenheit von Licht und gleichzeitiger Abwesenheit von aufgespeicherten Sehstoffen im wachen Zustande eintritt, und theoretisch den Ausgangspunkt der ganzen Darstellung bildet, indem durch Vergrößerung dieser minimalen Erregungen die Erregungsformen für Licht, Weiß und Farbe entstehen.

Es wurde angenommen, dass weder die Erzeugung, noch die Zersetzung der Sehstoffe empfunden werde. Die Empfindung sei ausschließlich den schwingenden Sehblättchen zuge-

ordnet, und auf diese sollen die Sehstoffmolecüle in ihrem zwischen Entstehung und Zersetzung im Lichte liegenden schwingenden Zustande, dem Zustande der photochemischen Induction, Einfluss haben.

Die Hypothese suchte vor allem folgenden Anforderungen zu entsprechen: 1. die Verwandtschaft der Anfangs- und Endfarben des Spectrums plausibel zu machen; 2. alle möglichen Farben aus den Mischungsverhältnissen der Wirksamkeit der drei Sehstoffe Purpur, Gelb und Cyanblau ohne Lücke und ohne Wiederholung hervorgehen zu lassen; 3. die Mischung je zweier im Spectrum benachbarter Farben zur dazwischenliegenden Spectralfarben begreiflich zu machen; 4. über das complementäre Verhalten bestimmter Farben und Lichtarten Rechenschaft zu geben; 5. zu zeigen, warum alle Farbentöne des Lichtes bei gesteigerter Intensität der Lichtquelle in farbloses Licht übergehen und bei sinkender Intensität an Sättigung zunehmen, bevor sie in Schwarz übergehen; 6. die Erscheinungen des simultanen Farbencontrastes, des complementärfarbigen Nachbildes und der complementären Nebenwirkung bei Lichtmischungen möglichst einfach zu erklären und endlich 7. die Erscheinungen der speciellen und der universellen Farbenblindheit so zu deuten, dass einerseits ein fester Standpunkt für den Überblick eingenommen wird, und doch andererseits der Fülle der variablen Befunde nicht durch die Hypothese mehr als nothwendig beschränkend vorgegriffen wird, wenngleich nach dieser Hypothese nicht jede Stelle des Spectrums unabhängig von allen anderen in der Farbe variieren kann.

K. u. k. Hofbuchdruckerei Karl Prochaska in Teschen.

